

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Семенов Александр Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СЕРВИСА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ СЕТЯХ НА ПРИМЕРЕ
МЕТРОПОЛИТЕНА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:

асс., Э.Э. Казаков

«___» _____ 2016

Заведующий кафедрой:

д.г.н, доц. Е.Г. Капранов

«___» _____ 2016

г. Санкт-Петербург

2016

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Проблема позиционирования	7
1.1 Определение позиционирования	7
1.2 Методы измерения пространственных координат	8
1.2.1 Астрономо-геодезические	9
1.2.2 Инерциальные	10
1.2.3 Фотограмметрические	10
1.3 Глобальные системы позиционирования(GPS)	12
1.4 Локальные системы позиционирования(LPS)	13
1.4.1 Беспроводные сети	13
1.4.2 Инерциальные системы	15
1.4.3 Светодиодные лампы	15
1.4.4 Магнитное поле	16
1.4.5 QR-коды	17
1.4.6 Гибридные системы	18
1.5 Позиционирование в линейных сетях как подмножество задач позиционирования в помещениях	19
1.5.1 Позиционирование в метрополитене	21
Глава 2. Обоснование методики позиционирования в линейных сетях	23
2.1 Характеристика цифровой сотовой сети	24
2.2 Позиционирование на основе сигнала цифровой сотовой сети	25
2.3 Локализация по шаблону	26
2.3.1 Общий принцип	26
2.3.2 Офф-лайн фаза. Географическая привязка	26
2.3.3 Офф-лайн фаза. Нормализация данных	28
2.3.4 Он-лайн фаза. Алгоритм позиционирования	31
2.4 Математическая оценка алгоритма позиционирования	33
Глава 3. Сбор и анализ данных	35
3.1 Технология сбора данных	35
3.2 Мониторинг состояния БД	37
Глава 4. Разработка программного обеспечения	39
4.1 Создание и обработка базы шаблонов.	39
4.2 Программное обеспечение для обработки данных	49
4.3 Мобильное приложение для позиционирования	50

Заключение	52
Список сокращений и условных обозначений	53
Список литературы	54
Приложение А. Листинги программного кода	58
Приложение Б. Картографическая визуализация состояния сотовой сети метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга в веб-гис NextGisWeb	61

Введение

Информация о *местоположении* объекта используется для решения как строго научно-производственных, так и бытовых задач: обывателю она позволяет ориентироваться на местности, находить интересующие места, прокладывать маршруты [1]; для географа важную роль играет связь объекта изучения с его положением во времени и пространстве; координированные данные являются основой для построения пространственных моделей в ГИС [2], используются для индексации данных в поисковых машинах [3].

На протяжении тысячелетий было разработано множество методов и способов определения местоположения. Однако революция в решении задачи местоопределения произошла с появлением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Причиной этому послужили глобальность охвата, высокая точность и оперативность спутникового позиционирования [2]. Сегодня наблюдается тенденция роста потребителей ГНСС-технологии в связи с расширением рынка мобильных устройств. Наличие портативных приемников в смартфонах привело не только к активному *использованию* приложений на основе пространственных данных (LBS) [4], но и к *созданию* вторичных продуктов: так новые возможности для составления карт открыл феномен «краудсорсинга» [5].

Несмотря на то, что геодезические спутники покрывают всю поверхность Земли, ГНСС-приемники нельзя применять повсеместно. Их явное использование в закрытых пространствах ограничено по причине ослабления сигнала, проходящего через землю, стены, воду и другие препятствия. И хотя все же существуют способы, основанные на использовании ретрансляторов спутниковых сигналов (псевдолитов), они едва ли могут быть решением в связи с затратами на установку дорогостоящего оборудования и низкой точностью местоопределения [6]. Поэтому для закрытых пространств необходимо искать альтернативные способы решения задачи.

Помещения являются одним из примеров таких закрытых пространств. В них люди проводят большую часть своего времени, что вызывает интерес к системам определения местоположения [7]. Такие системы находят применение в классических задачах навигации, составлении карт, размещении контекстной информации, рекламы и тд., а также характерных задач обеспечения безопасности в процессе строительства [8], помощи в чрезвычайных ситуациях, удаленного управления машинами/роботами [9].

Единого и общепринтого способа позиционирования в помещениях, как в случае с ГНСС, на сегодняшний день не существует [10]. Напротив, создается много различных систем и выбор конкретной часто зависит от структуры пространства, объекта, местоположение которого необходимо определять, а также требуемых точностей [11]. Существующий набор способов ранжируется в зависимости от затрат на реализацию, что также играет немаловажную и, зачастую, решающую роль. Отсюда остается большое количество пространств, где задача определения местоположения все еще остается нерешенной.

Одним из примеров таких пространств является сеть городского метрополитена. С точки зрения пространственной архитектуры, она представляет собой точки(станции), соединенные линиями(туннелями). Первые – это классический пример помещений, аналогичных торговым центрам, комплексам, магазинам и другим сооружениям, где человек или робот может перемещаться практически свободно. Двигаясь по линиям, вектор перемещения определен, что облегчает решение задачи местоопределения. Позиционирование в линейной сети метрополитена может быть использовано в качестве модели для применения в других аналогичных структурах, таких как автомобильные и железные дороги, тоннели, шахты, трубы и пр.

Цель представленной работы – разработать систему определения местоположения в сети метрополитена и оценить возможность ее использования в других линейных сетях. Концепция разработки основана на принципах минимизации финансовых вложений, открытости данных и программного обеспечения, а также применения краудсорсингового подхода.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выбрать способ позиционирования
2. Разработать алгоритм системы позиционирования
3. Создать прототип клиентского приложения для позиционирования в метрополитене
4. Провести математическую и практическую оценку точности системы позиционирования

Практическое применение аналогичных систем позиционирования в линейных сетях достаточно широко. В [12] описывается система позиционирования на основе данных глобальной цифровой сотовой сети(GSM¹) в ЦЕРНе. В [9] используется аналогичный подход для навигации роботизированных машин по добыче угля, а в [13] для этих же целей применяются инерциальные системы. На основе инерциальных систем также работает система позиционирования в линейной сети метрополитена, описанная в [14].

При изучении особенностей систем позиционирования в целом, было выявлено множество факторов, влияющих на использование конкретного способа позиционирования. В связи с этим было принято решение создать гибридную систему, которая сочетает в себе несколько подсистем позиционирования. Первый шаг для ее создания – это использование GSM-позиционирования как базовой подсистемы. В работе описываются теоретическая и практическая части ее разработки.

В *первой главе* раскрывается определение позиционирования, приводится перечень существующих методов и способов. Определяется место позиционирования в линейных сетях на основе GSM, как класса задач позиционирования.

Во *второй главе* приводится краткая характеристика GSM, описываются особенности данных. Дается теоретическое обоснование выбранного способа позиционирования, рассматриваются используемые математические подходы. Практическая реализация приводится в третьей и четвертой главах. В третьей главе описывается методика сбора данных. Четвертая

¹В дальнейшем под GSM будет пониматься глобальная цифровая сотовая сеть в целом, а не ее стандарт второго поколения

глава посвящена реализации программного обеспечения. В заключении говорится о возможных вариантах развития системы. Резюмируются итоги исследования.

Глава 1. Проблема позиционирования

Человечество издавна интересовали вопросы «Где я нахожусь?» и «Куда я должен двигаться?». До сих пор, имея определенную подготовку, на них можно ответить, используя приметы ландшафта и вооружившись компасом и картой. Для увеличения точности определения местоположения изобретались десятки астрономических, геодезических приборов и совершенствовались методы линейно-угловых измерений[15]. В XX веке запуск первого ИСЗ положил начало революционной технологии определения пространственных координат методами спутниковой геодезии. Создаваемая для военной цели оперативного и автономного измерения пространственных координат, ориентировки и скорости движения объектов, в конечном счете системы спутникового позиционирования нашли применение в решении не только научных, но и бытовых задач. Однако спутниковые методы справляются с решением задачи позиционирования лишь до тех пор, пока речь не заходит о местах, где распространение сигнала ограничено или невозможно. В этом случае в силу вступают альтернативные способы позиционирования [4],[11].

1.1 Определение позиционирования

В соответствии с [16] *позиционирование* – «получение пространственных координат объекта по наблюдениям навигационных спутников с использованием аппаратуры потребителей ГНСС». Как видно из определения, в сущности, задача позиционирования заключается в определении координат объекта на местности. Известно, что ее можно решать как в глобальной(относительно общеземной модели), так и в локальной(в пределах определенной территории) системах координат. В глобальной системе вычисляют абсолютные геоцентрические координаты, а в локальной – относительные. Традиционно для определения абсолютных координат используют астрономические методы, основанные на пространственно-временных параметрах небесных светил. Для определения относительных координат используют геодезические и фотограмметрические методы, основанные на измерениях относительно наземных пунктов с известными координатами. На таком принципе основаны классические способы триангуляции, полигонометрии, тахеометрии и фототриангуляции.

Астрономические и геодезические измерения проводятся в оптическом диапазоне, вследствие чего основным требованием является наличие оптической видимости точек наблюдения. По этой причине, возможность проведения работ зависит от погодных условий, рельефа местности, времени суток. Кроме того, измерительный процесс занимает продолжительное время и требует специализированных знаний. Встает задача создания *оперативного* и *автономного* определения местоположения. Объективных причин для их создания множество: задачи морской, воздушной и подземной, подводной навигации и т.д.. Впервые они

стали осуществимы с изобретением *инерциальных систем навигации(ИНС)*, которые позволяют определять положение, скорость, перемещение объекта на основании собственных датчиков. Эти системы, как и в случае с классическими геодезическими и фотограмметрическими методами, могут измерять параметры перемещения только в случае, если известно исходное положение объекта. Другими словами, ИНС позволяют определять *относительные* координаты объекта.

Для создания системы оперативного определения *абсолютных* координат в эксплуатацию была введена ГНСС, вместо естественных небесных светил использующая искусственные спутники Земли. В связи с абсолютной автономностью и оперативностью доминирующее место в решении задачи местоопределения сегодня занимает именно *спутниковое позиционирование*.

Возвращаясь к терминологии, более научное определение дается в [17]: «*позиционирование* – определение по спутникам параметров пространственно-временного состояния объектов, таких как координаты объекта наблюдения, вектор скорости его движения, приращение координат по каждой координатной оси между двумя объектами, точное время наблюдения» . Как видно термин не является всеобъемлющим и априори относит определение местоположения исключительно к задачам *спутникового позиционирования*. Астрономические, геодезические, фотограмметрические и даже инерциальные методы, в сущности решающие ту же задачу, в определении не фигурируют. Кроме того, спутниковые системы навигации охватывают хоть и глобальное, но ограниченное пространство для применения: при таком способе позиционирования измеряют параметры сигнала, который переотражается и теряет мощность под водой, землей, в горах и помещениях. В связи с этим можно констатировать, что ГНСС решение задачи не ограничивается.

Для того, чтобы выделить отдельный класс способов позиционирования, решающих проблему ГНСС, в зарубежной литературе приводится термин *локальных систем позиционирования(LPS)*, которые позволяют в автономном и оперативном режиме определять пространственное положение объекта в *ограниченном пространстве* [18].

1.2 Методы измерения пространственных координат

Несмотря на появление абсолютно новых подходов к решению задачи позиционирования как на глобальном, так и на локальном уровне, все они основаны на классических методах измерения положения координат точек местности. 1.1.

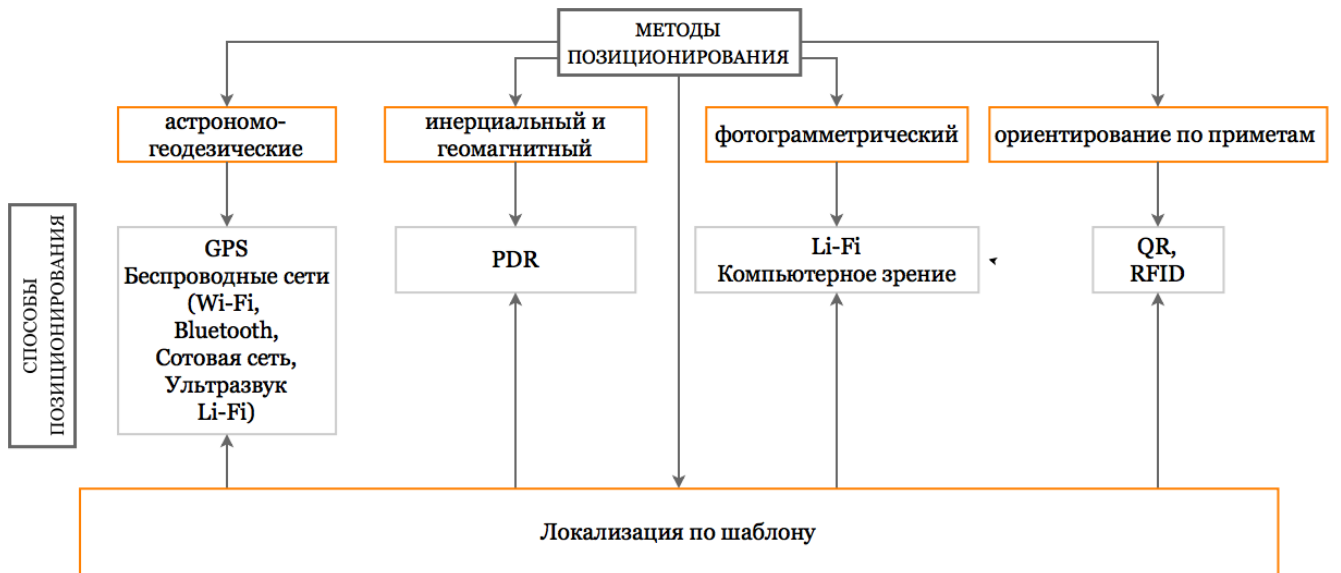


Рисунок 1.1 — Связь методов и способов оперативного позиционирования

1.2.1 Астрономо-геодезические

Классическая задача определения координаты пункта A , при известных координатах пунктов A_1, A_2, \dots, A_N и углах $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ решается при помощи **угловой засечки** по формулам Юнга (прямая задача) и Гаусса (обратная задача). Чтобы построить один треугольник засечки, необходимо иметь хотя бы два исходных пункта. Однако обычно имеется несколько треугольников, объединенных в сеть, и в этом случае решается система уравнений (прямая задача):

$$\begin{cases} X_A = \frac{X_1 \cdot \text{ctg}(\alpha_2) + X_2 \cdot \text{ctg}(\alpha_1) - Y_1 + Y_2}{\text{ctg}(\alpha_1) + \text{ctg}(\alpha_2)} \\ Y_A = \frac{Y_1 \cdot \text{ctg}(\alpha_2) + Y_2 \cdot \text{ctg}(\alpha_1) - X_1 + X_2}{\text{ctg}(\alpha_1) + \text{ctg}(\alpha_2)} \\ \dots \\ X_A = \frac{X_{n-1} \cdot \text{ctg}(\alpha_m) + X_n \cdot \text{ctg}(\alpha_{m-1}) - Y_{n-1} + Y_n}{\text{ctg}(\alpha_{m-1}) + \text{ctg}(\alpha_n)} \\ Y_A = \frac{Y_{n-1} \cdot \text{ctg}(\alpha_m) + Y_n \cdot \text{ctg}(\alpha_{m-1}) - X_{n-1} + X_n}{\text{ctg}(\alpha_{m-1}) + \text{ctg}(\alpha_n)} \end{cases} \quad (1.1)$$

где:

X_A, Y_A – координаты определяемой точки A

Традиционно, угловая засечка применяется в астрономических наблюдениях положения небесных светил и при построении геодезической сети способом триангуляции.

Линейную засечку используют для вычисления координат пункта A , при известных координатах пунктов A_1, A_2, \dots, A_N и *сторонах* D_1, D_2, \dots, D_n . Общий случай линейной засечки – пространственная линейная засечка, когда известны не только плановые но и высотные координаты исходных пунктов [17]:

$$\begin{cases} D_1^2 = (X_1 - X_A)^2 + (Y_1 - Y_A)^2 + (Z_1 - Z_A)^2 \\ D_2^2 = (X_2 - X_A)^2 + (Y_2 - Y_A)^2 + (Z_2 - Z_A)^2 \\ \dots \\ D_n^2 = (X_n - X_A)^2 + (Y_n - Y_A)^2 + (Z_n - Z_A)^2 \end{cases} \quad (1.2)$$

где:

X_A, Y_A, Z_A – координаты определяемой точки A

$X_i, Y_i, Z_i, i = 1..n$ – известные координаты точек A_i

Классический пример использования линейной засечки – геодезическая трилатерация.

1.2.2 Инерциальные

Сущность определения местоположения с использованием инерциальных методов состоит в определении положения движущегося объекта по линейным и угловым составляющим его ускорения. Линейные составляющие измеряются при помощи акселерометров, угловые – при помощи гироскопов. Зная исходное положение объекта, можно определить вектор его движения путем непрерывного интегрирования совокупности дифференциальных уравнений вида 1.3 [17].

$$x = \int_0^t \left(\int_0^t a_x dt + v_{x0} \right) dt + x_0 \quad (1.3)$$

Основное преимущество использования инерциальных систем – их независимость от внешних источников: все измерения проводятся на основе датчиков самой системы. Поэтому их можно применять вне зависимости от среды (водная или воздушная, закрытая или открытая). Накопление ошибок в таких системах прямо пропорционально времени, что является основной проблематикой их применения. По этой причине, для инерциальных систем необходима периодическая калибровка. Однако в случае изменения местоположения за короткий промежуток времени их точность становится на порядок выше. Эта особенность является определяющей для использования инерциальных методов при аэрокосмической съемке [19].

1.2.3 Фотограмметрические

Из фотограмметрии известно, что местоположения точек местности можно определять по фотоснимкам. В его основе лежит условие коллинеарности, согласно которому центр фотографирования, точка местности и ее изображение на фотоснимке лежат на одной прямой. Для того, чтобы им воспользоваться необходимо устройство для фиксации изображения,

сопряженное с вычислительным центром, элементы ориентирования изображения относительно геодезической системы координат, а также механизм определения положения точек фотоснимка во внутренней системе координат. Сущность определения положения точки местности по точкам фотоснимка показана на Рис. 1.2.

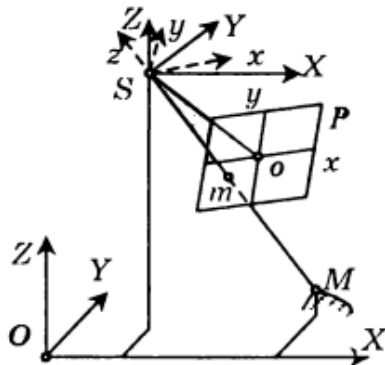


Рисунок 1.2 — Связь координат точек аэроснимка и местности [20]

Зависимость (1.4) позволяет связать координаты фотоснимка с координатами точки местности, если известна ее высота¹[20]:

$$\begin{cases} X_M - X_S = (Z_M - Z_S) \cdot \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y_M - Y_S = (Z_M - Z_S) \cdot \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{cases} \quad (1.4)$$

где:

X_M, Y_M, Z_M – координаты точки местности в системе OXYZ

x_m, y_m, z_m – координаты изображения точки местности на фотоснимке

X_S, Y_S, Z_S – линейный элементы внешнего ориентирования фотоснимка

x, y, z – координаты точек снимка в системе oху

$a_i, b_i, c_i, i = 1..3$ – направляющие косинусы, являющиеся функциями от угловых элементов внешнего ориентирования фотоснимка

Проблема использования зависимости (1.4) состоит в том, что обычно элементы внешнего ориентирования (ЭВО) и высота точки местности неизвестны. Для нахождения ЭВО, используют опорные точки местности с известными геодезическими координатами. Зная как минимум три такие точки, можно вычислить линейные и угловые элементы внешнего ориентирования. Для нахождения высоты есть два подхода: на основе теории стереопары фотоснимков строится модель рельефа или же берется некоторая средняя высота на всю площадь снимка. Применение того или иного подхода зависит от требуемых точностей.

¹Для системы координат SXYZ

1.3 Глобальные системы позиционирования(GPS)

Все ГНСС состоят из трех сегментов: космического(спутники), управляющего(наземные станции) и потребительского(приемники). Несмотря на радикальное изменение возможностей определения координат, спутниковое позиционирование основывается на классической пространственной линейной засечке. Для ее решения от каждого спутника(всего их должно быть не менее 4-х) к приемнику передаются т.н. эфемериды, в которых содержится информация о координатах спутников (Рис. 1.3). Расстояние вычисляется двумя способами: фазовым(РФА) и кодовым(ТОА) [21]. Первый имеет высокую геодезическую точность и, соответственно, стоимость. Второй же значительно ниже по точности, и цене приемного оборудования, и, как следствие, значительно более распространенный: именно кодовые приемники устанавливаются в смартфоны.

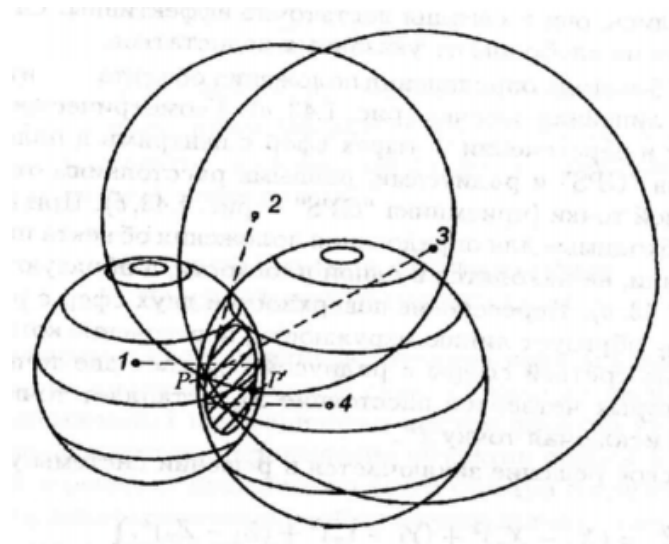


Рисунок 1.3 — Концепция определения положения объекта способом GPS [21]

В связи с накоплением ошибок при прохождении сигнала через атмосферу, для целей высокоточного позиционирования также применяется дифференциальный способ. Его суть состоит в вычислении приращения координат пунктов при измерении несколькими приемниками с учетом абсолютных координат опорной станции. В этом случае предполагается, что ошибки приемника на базовой станции будут повторяться и на соседних пунктах. Они могут быть учтены при помощи транслирования поправок, которые вычисляются по абсолютным координатам опорной станции [17].

Точность определения абсолютных координат при абсолютном ГНСС-позиционировании в плоскости ХУ составляет не более 3.5 метров. Использование же дифференциального способа и постобработки позволяет достигать миллиметровых точностей. [22]

Сегодня в штатном режиме действуют две полноценные ГНСС: американская(GPS)[22] и российская(ГЛОНАСС)[23]. Активно развиваются и ГНСС других стран: европейская(Galileo)[24] и китайская(Beidou)[25].

1.4 Локальные системы позиционирования(LPS)

1.4.1 Беспроводные сети

Беспроводные сети позволяют передавать информацию между устройствами(Bluetooth), обеспечивают выход в Интернет(Wi-Fi) и обеспечивают абонентов сотовой связью(GSM). Помимо этого, на их основе построены самые распространенные способы позиционирования в помещениях. Они подразделяются на локальные(LAN) и глобальные(WAN). В первых информация передается на коротких волнах, в последних – на длинных. Покрываемость локальных сетей значительно меньше, по сравнению с глобальными, а точность существенно выше[12]. Методика позиционирования во всех беспроводных сетях схожая и заключается в анализе параметров передающих станций на приемнике. В качестве приемника обычно выступает датчик смартфона. Передатчиком в GSM-сетях(CPS) является станция цифровой сотовой сети, в Wi-Fi сетях – точка доступа(AP), а в Bluetooth – специальные маячки(т.н. «биконы»).

В [4] приводится классификация способов позиционирования в беспроводных сетях:

- **Анализ соседства(Proximity)**. Местоположение определяется зоной покрытия некоторого радиопередатчика. Разброс ошибок будет прямо пропорционален площади покрытия конкретным передающим устройством [26].
- **Линейная засечка**. Классический геодезический метод измерения, в котором расстояние является функцией параметров сигнала [27].
- **Анализ сцены(Scene Analysis)**. Также известен как **анализ радиогаммы(Radio Frequency analysis)** и **метод локализации по шаблону(Fingerprinting)**. Точность этого метода считается самой высокой, но подвержена изменениям во внешней среде [4], [11], [8].

Анализ соседства не требует вычислений параметров сигнала. В случае использования этого метода, от точки Wi-Fi или Bluetooth передатчика требуется только его уникальный идентификатор, на основе которого можно получить координаты станции и привязанную к ней контекстную информацию[28].

При использовании *линейной засечки* и *локализации по шаблону* измеряют следующие параметры передающей станции, точки или маячка[29]:

1. **AOA(Angle Of Arrival)** – угол приходящего сигнала. Местоположение определяется по методу обратной угловой засечки. Главный недостаток – возникновение ложных углов вследствие переотражения приходящего сигнала.
2. **TOA(Time Of Arrival)** – время распространения сигнала(аналогичен кодовому способу ГНСС-позиционирования).
3. **POA(Phase Of Arrival)** – фаза принимаемого сигнала(аналогичен фазовому способу ГНСС-позиционирования).

4. RSS(Recieved-Signal Strength) – сила принимаемого сигнала.

При использовании *линейной засечки*, основанной на RSS, используют зависимость между расстоянием и силой принимаемого сигнала. Из законов телекоммуникации известна формула Фриса[30]:

$$P_d = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1.5)$$

где:

P_d – RSS

P_0 – сила сигнала, измеренная на калибровочном расстоянии

n – коэффициент потери мощности сигнала при распространении в некоторой среде

d – расстояние между приемником и передатчиком

d_0 – калибровочное расстояние

Из формулы следует, что, имея калибровочную мощность на известном расстоянии от передатчика, можно получить расстояние в любой точке покрываемой передатчиком зоны. Проведя аналогичные измерения одновременно с n вышек с известными координатами, можно получить n расстояний. Используя формулу линейной засечки, на следующем шаге можно вычислить местоположения принимающего устройства [27].

Методика *локализации по шаблону* состоит из двух этапов. Первая т.н. *офф-лайн фаза* заключается в последовательном измерении параметра сигнала(это может быть АОА, ТОА, РОА и/или RSS) в каждой точке помещения, на основе чего создается карта-радиограмма (Рис. 1.4). В *он-лайн фазе* данные, полученные в реальном времени сравниваются с имеющимися в базе данных. Наиболее схожий участок базы и будет являться текущим местоположением приемника[4].

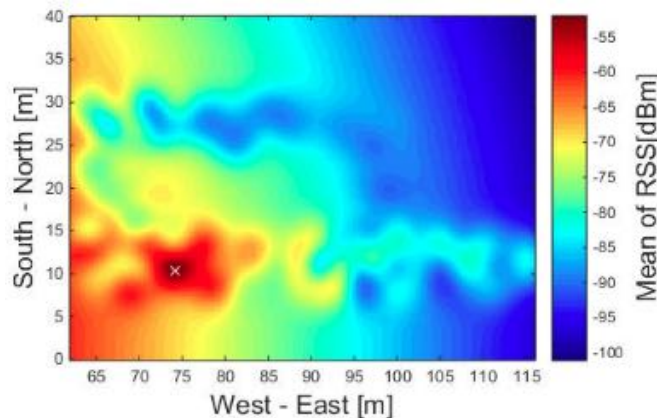


Рисунок 1.4 — Пример карты-радиограммы [31]

Выбор беспроводной сети для целей позиционирования в первую очередь зависит от требуемых точностей и финансовых возможностей заказчика. Так как спрос на сотовую связь и Интернет постепенно ведет к повсеместному внедрению цифровой сотовой сети и сети Wi-Fi, финансовые затраты на эти две технологии минимальны. Из них Wi-Fi сети дают более высокую (метровую) точность [4], в связи с чем по праву занимают лидирующую позицию по

популярности среди всех LPS. Хотя LAN сети заметно уступают всем беспроводным сетям по точности (от сотен до десятков метров [32]), они незаменимы на обширных пространствах, где нет необходимости в точном определении местоположения.

Сети Bluetooth развиты в меньшей степени, однако этот стандарт активно популяризируется компанией Apple, которая продвигает свой бренд маячков «iBeacon». В основном их применяют для целей геоконтекстной информации и навигации. Практическое применение биконов выявило две основные проблемы: недолговечность и высокое энергопотребление [33]. Несмотря на это, использование метода локализации по шаблону позволяет добиваться субметровых точностей позиционирования [34].

В ультразвуковых сетях (UWB) измеряются параметры сигнала на ультразвуковых волнах, в связи с чем чувствительность к изменениям во внешней среде намного ниже. Поэтому UWB системы обладают самой высокой точностью позиционирования ([35], [12]). Основным недостатком таких систем являются финансовые затраты на систему передатчиков ультразвуковых волн [11].

1.4.2 Инерциальные системы

Наиболее популярным способом позиционирования при помощи инерциальных систем является Pedestrian Dead Reckoning (PDR) – «навигационное счисление пути». PDR-системы построены на инерциальных системах, а основой для позиционирования служат встроенные в мобильные устройства акселерометры и гироскопы. С их помощью последовательно решают задачи определения шага (от момента отрыва стопы до ее постановки), его длины и направление движения пользователя. Отмечается, что способ удобен для определения местоположения роботов [36]. Когда же инерциальные системы используются человеком, возникает резкое накопление ошибок в связи со сложностью и случайностью его перемещения. Человек может класть смартфон в карман, поворачивать его перпендикулярно движению. Поэтому их часто используют для определения резких скачков ускорения в сочетании с другими системами позиционирования [37], [36].

1.4.3 Светодиодные лампы

Позиционирование по свету ламп стало возможным с появлением светодиодных ламп (LED), которые позволяют передавать информацию в оптическом диапазоне длин волн, аналогично Wi-Fi² [39]. Если лампы будут передавать на приемник собственные координаты,

²Отсюда произошел термин Li-Fi, впервые упомянутый Харальдом Хаасом на своем выступлении на TED-конференции в 2011 году [38]

то для определения местоположения может применяться фотограмметрический метод (см. раздел 1.4). Используется стандартный подход, за тем исключением, что в роли фотоаппарата выступает сенсор экрана мобильного телефона. При попадании на него света как минимум от трех ламп, можно найти элементы внешнего ориентирования мобильного устройства, после чего по координатам пикселей сенсора вычисляется его пространственное положение (Рис. 1.5). Фотограмметрический метод позволяет добиваться субметровой точности местопределения [40].

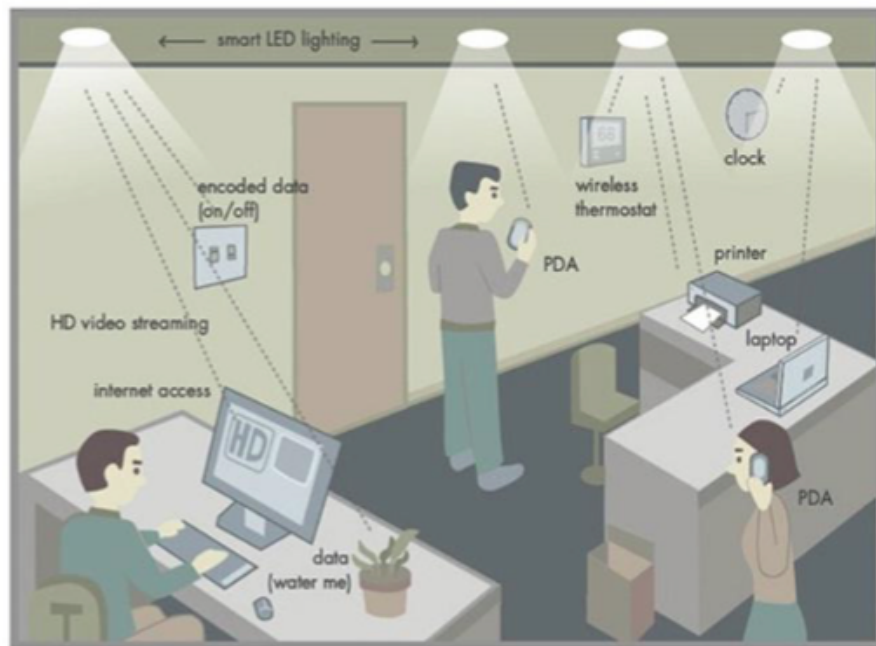


Рисунок 1.5 — Использование светодиодных ламп для передачи информации [39]

Существуют реализации систем позиционирования, основанных на силе принимаемого сигнала от LED. Принцип аналогичен тому, что применяется в сетях Wi-Fi, только вместо радиоволн, на приемник приходят оптические волны. При таком подходе добиваются субсантиметровой точности позиционирования [41].

Главное ограничение на широкое применение таких систем – это небольшая зона покрытия света от лампы, поэтому Li-Fi используют только в относительно небольших помещениях. Кроме того, при фотограмметрическом методе решения необходимо попадание света от трех ламп одновременно, что во многих местах не наблюдается.

1.4.4 Магнитное поле

Известно, что изменения в магнитном поле Земли вызваны наличием элементов железа в различных предметах. Помещения, где их концентрация особенно высока, обладают уникальной и неоднородной картиной магнитного поля. Эту неоднородность используют для

целей позиционирования: применяют метод локализации по шаблону. По аналогии с позиционированием по шаблону в беспроводных сетях, в оффлайн фазе составляется карта-шаблон исследуемой территории, в каждой ячейке которого содержатся параметры магнитного поля (Рис. 1.6). В онлайн фазе параметры магнетометра сравниваются с картой, после чего находится наиболее подходящий участок, который и будет показывать текущее местоположение устройства. MPS-позиционирование позволяет добиваться метровых точностей [42].

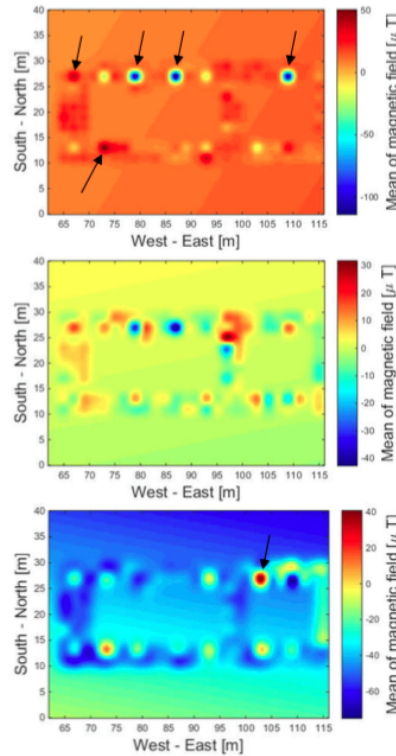


Рисунок 1.6 — Пример шаблона магнитного поля[31]

Преимуществом такой системы является отсутствие затрат на покупку дополнительного оборудования. Главный же недостаток – изменения во внутренней инфраструктуре помещения (к примеру, перепланировка), которые в свою очередь влияют на картину магнитного поля. При каждой флуктуации такого рода необходимо проводить повторные измерения для обновления карты-шаблона [11].

1.4.5 QR-коды

Классический представитель класса систем основанных на методе анализа соседства. Владелец помещения устанавливает специальные штрих-коды, с зашифрованной url-ссылкой на веб-страницу, на которой указываются географическое положение метки на плане здания и контекстная информация (текстовая, аудио, видео, реклама), относящаяся к данной точке. Пользователь, на мобильном устройстве которого предустановлено ПО для интерпретации QR-кода, фотографирует метку, после чего на экране отображается заложенная в нем инфор-

мация³. Способ считается выгодным с точки зрения финансовых затрат и скорости создания системы – сегодня он активно применяется для определения местоположения в музеях [43]. Однако способ неприемлем для непрерывного отслеживания местоположения.



Рисунок 1.7 — Пример QR-кода на сайт <http://openstreetmap.ru>

1.4.6 Гибридные системы

Во всех перечисленных способах есть свои недостатки. Поэтому часто разрабатываются системы, сочетающие в себе все плюсы составляющих. В [44] описывается использование гибридной системы на основе сочетания MPS, Wi-Fi и PDR. В этом исследовании проводится сравнительный анализ систем во всех возможных сочетаниях (Wi-Fi и PDR, MPS и Wi-Fi и тд.) и их программная реализация (Рис. 1.8). Средняя ошибка комбинации трех компонентов составила порядка 3-х метров. В [27] используют сочетание беспроводных сетей Wi-Fi и GSM. Авторы утверждают, что для позиционирования по точкам доступа Wi-Fi на основе линейной засечки необходимо иметь три передатчика, что в помещениях можно наблюдать не всегда. Поэтому была разработана система, которая в качестве альтернативных/дополнительных точек использует станции сотовой сети (Рис. 1.9).

³Идея QR-позиционирования по сути аналогична ориентированию на местности. Вместо базы данных используется человеческая память, а вместо QR-ссылок – характерные признаки ландшафта.

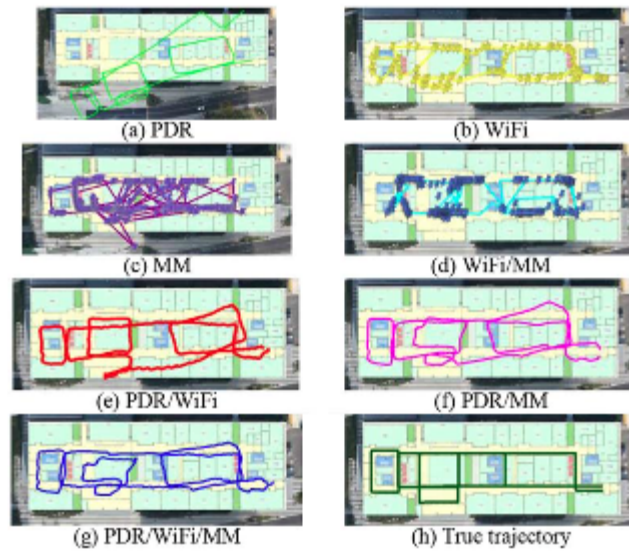


Рисунок 1.8 — Результаты навигации при использовании различных комбинаций гибридных систем[44]

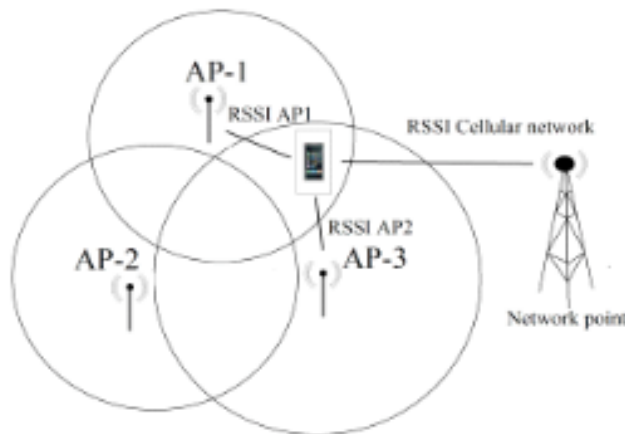


Рисунок 1.9 — Пример гибридных систем позиционирования. Wi-Fi и GSM[27]

Кроме того системы включают в себя ГНСС, что позволяет осуществлять непрерывное позиционирование при переходе с открытых в закрытые пространства[45].

1.5 Позиционирование в линейных сетях как подмножество задач позиционирования в помещениях

В обобщенной задаче определения местоположения подразумевается, что объект может находиться в любой точке пространства и характер его движения случайный. Однако в большинстве случаев он перемещается в пределах некоторого участка транспортной сети.

Как отмечалось ранее, несмотря на высокую точность спутникового позиционирования, в городской среде, в горах, где есть препятствия для распространения радиосигнала, проис-

ходит его переотражение, вследствие чего ошибка позиционирования увеличивается. В связи с этим в GPS-навигаторах учитывается тот факт, что вероятность нахождения транспортного средства на дороге, а не внутри здания или озера, выше. Для этого разрабатываются алгоритмы корреляции перемещения объекта с дорожной сетью, которые в англоязычной литературе объединены под термином «map matching» [46].

Идея «map mathing» может быть применена и в локальных системах позиционирования. В помещениях, под землей перемещение ограничено самим пространством. Поэтому для позиционирования в железнодорожных и автомобильных туннелях, в трубах или сети метрополитена можно решать задачу только на тех участках, где перемещение объекта в принципе возможно.

Так для обеспечения безопасности в процессе добычи полезных ископаемых людей постепенно заменяют автоматизированные системы. К примеру, решают задачу позиционирования и навигации вагонеток при добыче угля. Шахта представляет собой линейную сеть с расположенными внутри нее мобильными станциями, по которой двигаются вагонетки. В [9] станции используют для GSM-позиционирования по методу локализации по шаблону. Авторы отмечают, что такой подход позволяет им добиваться необходимых точностей. Существуют и аналогичные исследования, однако вместо GSM применяют инерциальные системы [13].

В [12] ставится задача позиционирования с субметровой точностью в другой линейной системе – подземном туннеле ЦЕРНа. Его размеры достаточно внушительные: восемь секций по 27км в длине, радиус каждой из которых составляет 2.2 м. Для создания дополнительной инфраструктуры высокоточного позиционирования(к примеру UWB) в системе такого размера требуются большие финансовые затраты. Поэтому GSM-позиционирование по шаблону – наиболее оптимальное решение (Рис. 1.10). Их расположение позволяет использовать для этого не только базовые, но и соседние станции. В работе проводится анализ изменения силы сигнала в зависимости от расположения мобильной станции (Рис. 1.11) и условий измерения. В результате была достигнута 80-метровая плановая точность. Авторы заключают, что добиться требуемых точностей, им поможет дополнительная калибровка шаблонов.

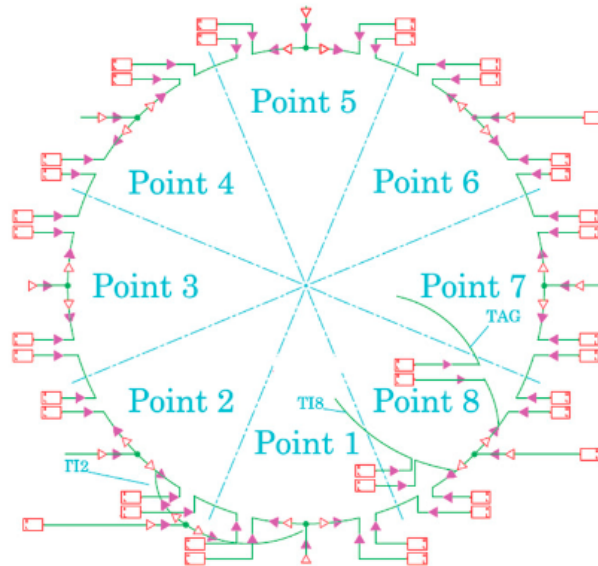


Рисунок 1.10 — GSM станции(отмечено стрелками) в туннеле ЦЕРНа[12]

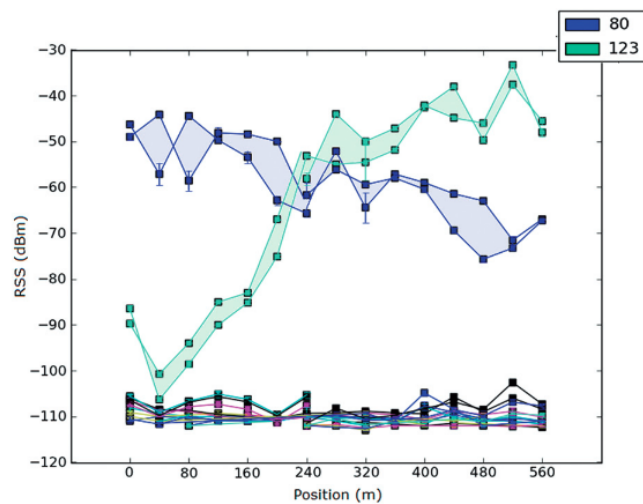


Рисунок 1.11 — Пример шаблона, созданного на основе GSM в ЦЕРНе. Линиями показываются измерения. Цветом обозначены сигналы от разных базовых станций[12].

1.5.1 Позиционирование в метрополитене

Для навигации на станциях метрополитена ориентируются при помощи подвесных, настенных и напольных указателей, а для прокладки маршрута по линиям соответствующие приложения. Существует программное обеспечение для прокладки непрерывного маршрута как на станциях, так и на линиях метро. Однако системы, которая позволяла бы определять местоположение на этих маршрутах, на сегодняшний день не существует, есть только прототипы.

Один из примеров такой системы описан в работе [14], посвященной системе навигации в метрополитене на основе инерциальной системы. Разработчики создали первое в своем роде мобильное приложение, именуемое *MetroNavigator*, которое позволяет определять местоположение при помощи датчиков ИНС смартфона. Во время перемещения поезда метрополитена, пользуясь таким приложением, отслеживающего характер движения поезда по данным акселерометров и гироскопов, видит на экране свое местоположение, время до прибытия в пункт назначения/следующей станции и просматривает наземные точки интереса (Рис. 1.12).

Основная проблема при работе с *MetroNavigator* – накопление ошибок при продолжительных маршрутах, в связи с чем для калибровки ИНС в дальнейшем планируют использовать точки Wi-Fi.



Рисунок 1.12 — Визуализация режима навигации в *MetroNavigator* [14]

На рынке мобильных приложений для навигации в метро также существует несколько примеров, в которых используются методы анализа соседства и линейной засечки [47],[48]. Однако в связи с тем, что одна GSM-станция охватывает сразу несколько станций метрополитена, точность таких систем остается невысокой.

Глава 2. Обоснование методики позиционирования в линейных сетях

Как и в большинстве подходов к решению задачи позиционирования в помещениях с использованием алгоритма локализации по шаблону, процесс разработки системы делится на два блока: создание базы данных(офф-лайн фаза) и разработка алгоритма определения местоположения(он-лайн фаза).

Применительно к поставленной задаче, в основу создания первого блока положен следующий принцип. Группа операторов перемещается по метрополитену и осуществляет сбор данных, используя мобильные устройства с необходимыми встроенными датчиками. По окончании сбора, данные отправляют на сервер обработки, который в свою очередь проверяет их на предмет разного рода ошибок, осуществляет географическую привязку, уравнивает базу данных и выдает результат о количестве и качестве собранных данных в графическом и картографическом представлениях(Рис. 2.1). Операторы проверяют текущее состояние сети и принимают решение на предмет необходимости дальнейшего сбора данных.

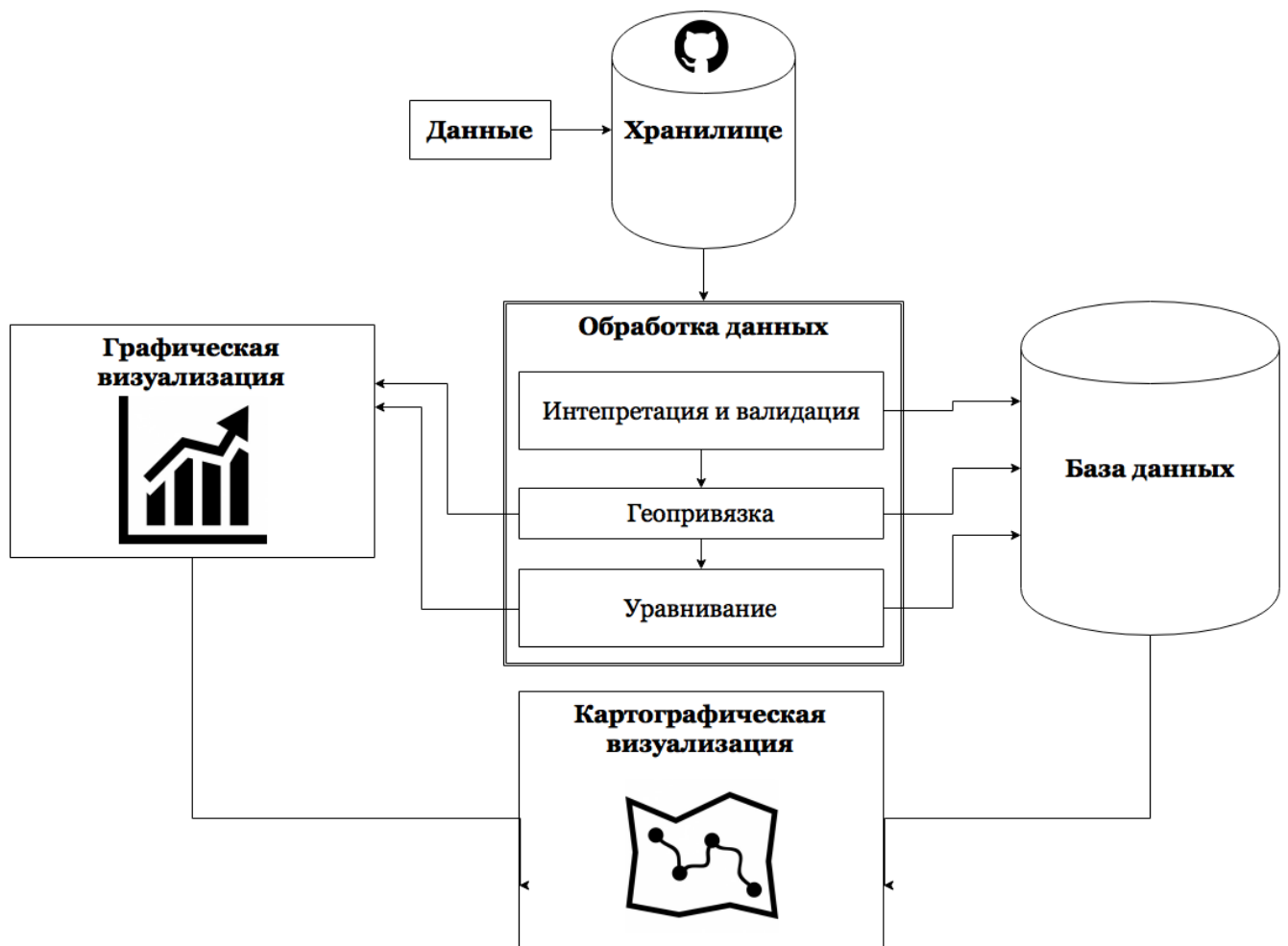


Рисунок 2.1 — Архитектура системы. Серверная часть

Второй блок также состоит из нескольких этапов. Сначала выбирается и математически обосновывается некоторый набор возможных для применения алгоритмов определения место-

положения. Затем каждый из них обосновывается математически и реализуется программно. Сопоставление результатов определения местоположения разными алгоритмами позволяет провести априорную оценку точности каждого, а также разработать наиболее подходящую версию прототипа уже на мобильной платформе.

2.1 Характеристика цифровой сотовой сети

Исходная концепция разрабатываемой системы не предполагает затраты на покупку дополнительного оборудования или модификации существующего. Этот факт служит обоснованием выбора в качестве базы сеть *цифровой мобильной сотовой связи*. Век цифровых технологий привел к широкому развитию этой сети, благодаря потребностям в телефонной связи, СМС, доступу в Интернет и пр[49]. В городских условиях, где концентрация абонентов высока, сотовая сеть развивается особенно активно: увеличивается количество станций, применяются новые стандарты передачи данных. В последние десятилетия пассажиры пользуются услугами операторов сотовой связи в метрополитене [50], что является хорошим подспорьем для использования сотовой сети как основы для создания системы позиционирования в подземном транспорте.

В силу исторического развития, традиционно мобильные сотовые сети классифицируют по поколениям:

1. **2G.** Цифровая сотовая сеть, эксплуатируемая по стандарту GSM, с помощью которого предоставляются пакеты услуг телефонной связи и передачи СМС. Над GSM существуют дополнительные надстройки, такие как GPRS и EDGE, увеличивающие скорость обмена данными и предоставляющие возможность выхода в Интернет. На сегодняшний день остается самой распространенной сетью в мире[49].
2. **3G.** Широкополосная цифровая сотовая сеть, распространяемая по стандартам WSDMA, UMTS. Обеспечивает повышенную скорость передачи данных и выход в Интернет[49].
3. **4G.** Новейшая высокоскоростная(до 1Гбит/сек) широкополосная цифровая сотовая сеть распространяемая по стандартам LTS и WiMAX [49]

Системы всех поколений цифровой сотовой сети основаны на схожем принципе построения и включают в себя три подсистемы[49]:

- **Мобильные станции.** Каждая состоит из подвижного терминала(мобильный телефон) и SIM-карты, которая отвечает за идентификацию и регистрацию абонента в сотовой сети. При регистрации пользователя в сотовой сети ему присваивается 16-значный уникальный идентификатор абонента *IMSI*, содержащийся в SIM-карте. По *IMSI* можно определить страну(МСС) и оператора(MNC) регистрации. На сегодняшний день наиболее популярными операторами сотовой сети в России являются «МТС», «Мегафон», «Билайн» и «Теле2»[49].

- **Подсистема базовых станций(БС).** Отвечает за приемопередачу сигнала с мобильным устройством и центром коммутации мобильной связи. БС обеспечивает покрытие сотовой сетью в пределах территории, ограниченной зоной обслуживания т.н. *соты*. Каждая БС имеет уникальный идентификатор соты (LAC) и идентификатор самой станции (CID).
- **Коммутационная подсистема(MSC).** Центральный компонент системы, устанавливающий исходящие вызовы, осуществляющий доставку СМС и т.д..

Мобильная станция также обладает возможностью приема данных не только с базовой станции, но и одновременно с нескольких(соседних). Эта функция была реализована во избежание потери сигнала при перемещении пользователя за пределы зоны действия базовой станции. Таким образом, на мобильное устройство поставляется набор идентификаторов, определяющих страну, поколение сети, оператора, соту, базовую и соседние станции. Помимо этих параметров, на мобильном устройстве также может быть измерена сила принимаемого от базовой станции сигнала(RSS).

2.2 Позиционирование на основе сигнала цифровой сотовой сети

Как отмечалось ранее, сила сигнала может быть использована для местоопределения способами *линейной засечки* и *локализации по шаблону*. В первом случае последовательно находится зависимость расстояния от силы сигнала (формула 1.5), а затем, при достаточном наборе станций сотовой сети с известными координатами, местоположение вычисляется по формуле 1.2. Если же координаты базовых станций неизвестны, а координаты приемника известны, то при многократном получении идентичного набора параметров, можно определить местоположение базовой станции. Определив таким образом координаты набора вышек, можно решать прямую задачу определения местоположения принимающего устройства, используя аналогичный подход[51].

Однако исходя из формулы линейной засечки, ее применение требует выполнения главного условия: наличие данных о местоположении вышек или возможность их получения в данных условиях. В описываемой задаче условие не выполняется, в связи с чем используется метод локализации по шаблону.

2.3 Локализация по шаблону

2.3.1 Общий принцип

Пусть в некоторый интервал времени на исследуемой территории наблюдается m активных БС S . Тогда каждая i -я БС покрывает некоторую область и описывается набором данных:

$$S_i = [rss_{i1}, rss_{i2}, \dots, rss_{in}] \quad (2.1)$$

где:

n – количество ячеек в шаблоне

S_i – БС

rss_{ij} – RSS в точке L_i , от станции S_i

Искомый шаблон есть не что иное, как совокупность данных от всех доступных БС. Визуально такой шаблон представляет собой карту-радиограмму RM и может быть описан как:

$$RM = [T_1, T_2, \dots, T_m] \quad (2.2)$$

где:

T – набор (S_i, L_i)

Для создания базы шаблонов и составления карты необходимо:

1. **Измерить силу сигнала** на всей исследуемой территории
2. В соответствии со схемой сбора данных, осуществить **географическую привязку** каждой ячейки шаблона(L_i)
3. «Нормализовать» данные: устранить случайные и систематические ошибки, провести уравнивание

После завершения этапа подготовки данных, создается собственно алгоритм позиционирования, который заключается в идентификации измеренного параметра в подготовленной базе шаблонов и сопоставлении его с наиболее схожей точкой rss_{i+k} , пространственное положение L_{i+k} которой и будет являться решением задачи.

2.3.2 Офф-лайн фаза. Географическая привязка

На первом этапе создания шаблона необходимо выбрать способ привязки собранных данных. В исходной задаче имеется:

1. **территория** – линии метрополитена
2. **объект** – поезд метрополитана
3. **регистрирующее устройство** – мобильная станция

Исходная задача сводится к определению местоположения поезда, движущегося внутри линейной сети метрополитена, при помощи мобильного телефона, принимающего различные параметры от базовой и соседних вышек сотовой сети. Так как управлять движением поезда пользователь не может, то единственным выход – определенным образом вычислить характер его движения¹. Все поезда перемещаются по одной схеме: в пределах одной ветки с остановками на каждой станции (за исключением ситуаций, когда та или иная станция закрыты по техническим причинам). Пассажир же заранее знает станцию прибытия и отправления, координаты которых могут быть получены с карты. Кроме того, кинематика движения поезда на каждом перегоне условно может быть описана как последовательное равноускоренное, равномерное и равнозамедленное движение.

$$\begin{cases} S_{a1} + S_{a2=0} + S_{a3} = S \\ \frac{V \cdot (t_1 - t_0)}{2} + V \cdot (t_2 - t_1) + \frac{V \cdot (t_3 - t_2)}{2} = S \\ S_{t1} = \frac{V}{\Delta t} (t - t_0)^2 \\ S_{t2} = V \cdot t + S_{t1} \\ S_{t3} = \frac{V}{\Delta t_3} \cdot (t - t_2)^2 + S_{t2} + V \cdot t \end{cases} \quad (2.3)$$

где:

S_{a1}, S_{a2}, S_{a3} – расстояния от станции отправления до текущего положения поезда на участках равноускоренного, равномерного и равнозамедленного движения.

S – длина перегона

V – скорость поезда после разгона

t_0, t_1, t_2, t_3 – моменты времени начала движения, максимального ускорения, начала остановки и полной остановки.

t – текущий момент времени

Решение системы уравнений позволит получить расстояние в любой момент времени от начала движения поезда. Все, что для этого необходимо – это знать моменты времени $t = 0..3$. Для их регистрации понадобятся часы и фиксатор моментов времени, которые будут записываться в память устройства. Также, оператор, собирающий данные, должен сообщать регистрирующей системе станции отправления и прибытия.

Получив набор расстояний, можно приступить к определению координат зафиксированных точек. Необходимым условием является наличие геоданных по линейной сети и станциям метрополитена. Имея их, можно определить координаты зафиксированных точек способом линейной интерполяции:

¹Этот факт отличает передвижение в метрополитене от некоторых других упомянутых линейных систем: в шахтах движение вагонеток может контролироваться оператором

$$\begin{cases} Dx = Dx_i + \frac{Dx_{i+1}-Dx_i}{x_{i+1}-x_i} \cdot (x - x_i) \\ Dy = Dy_i + \frac{Dy_{i+1}-Dy_i}{y_{i+1}-y_i} \cdot (y - y_i) \end{cases} \quad (2.4)$$

где:

Dx, Dy – расстояния по осям абсцисс и ординат от исходной станции до текущего местоположения

$Dx_i, Dy_i, Dx_{i+1}, Dy_{i+1}$ – расстояние по осям абсцисс и ординат от исходной станции до $i, i + 1$ -го узла линии

$x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}$ – пространственные координаты $i, i + 1$ узла линии

x, y – искомые координаты текущего местоположения

2.3.3 Офф-лайн фаза. Нормализация данных

После привязки данных можно приступить ко второму этапу. В нашем случае шаблоны представляют совокупность параметров, описывающих сигналы, которые принимаются со станций сотовой сети. Параметром, который наиболее точно характеризует изменение пространственного положения мобильной станции является сила сигнала. Как отмечалось, есть прямая зависимость от расстояния до сотовой станции. В процессе движения, расстояние, в свою очередь, зависит от времени. Следовательно, можно задать функцию силы сигнала от расстояния (Рис. 2.2).

$$P_i = f(D_i) \quad (2.5)$$

где: i – уникальный идентификатор вида «MCC-MNC-LAC-CID»

Такая функция и будет являться шаблоном для конкретной станции сотовой сети.

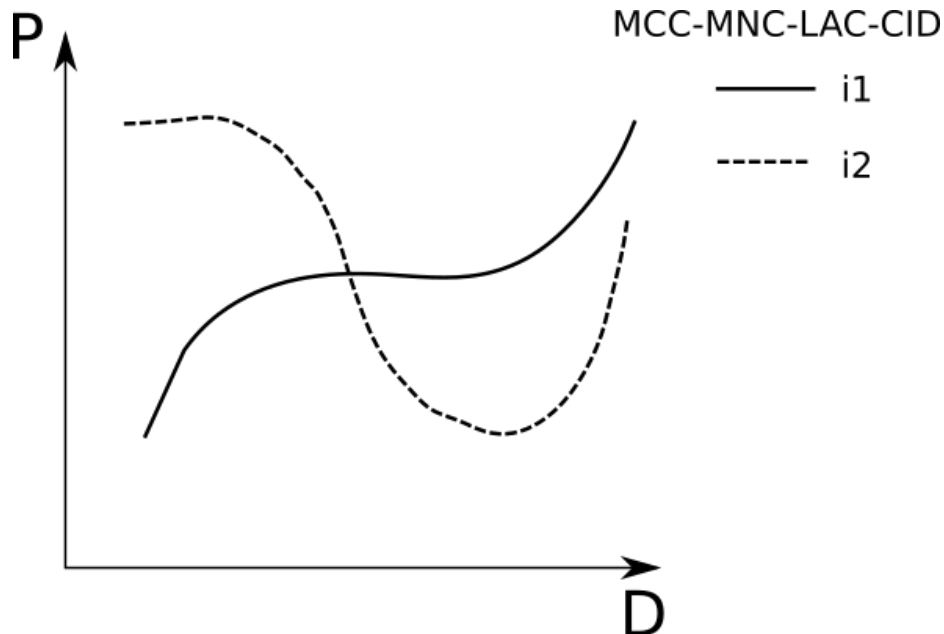


Рисунок 2.2 — Общий вид шаблона

Увеличение количества измерений приводит к избыточности данных, а следовательно возникает задача уравнивания. При решении такого рода задач, на первом этапе учитывают *систематические ошибки*, а затем используют наиболее подходящий математический аппарат для фильтрации *случайных ошибок*. Применительно к искомой задаче, *систематические ошибки* главным образом связаны с привязкой данных, вследствие чего наблюдается сдвиг по временной оси (Рис. 2.3).

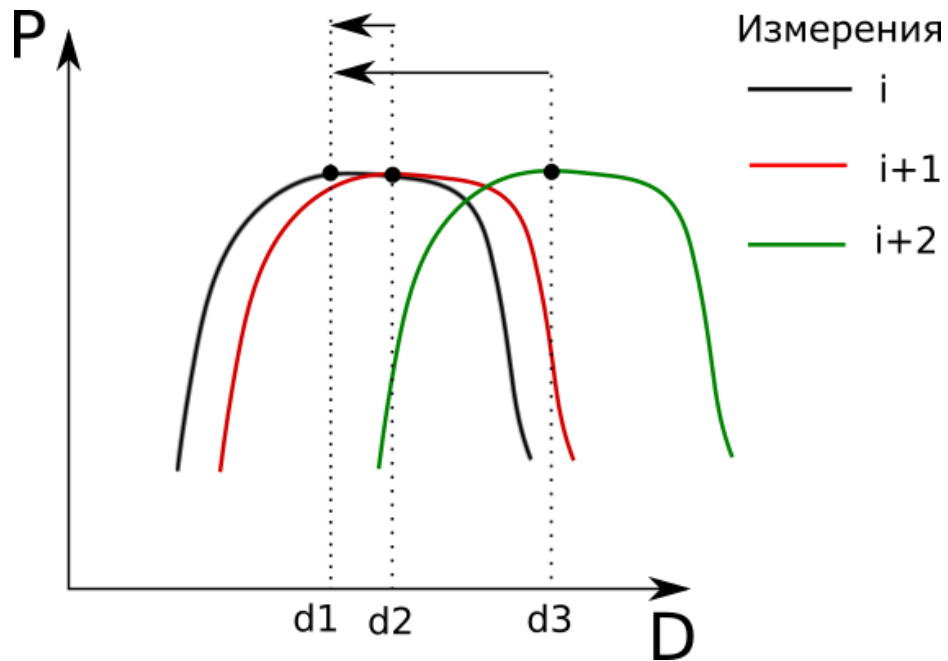


Рисунок 2.3 — Устранение ошибки за привязку данных

Он устраняется при помощи последовательного сдвига сигналов относительно друг друга. Сдвиг выполняется на основе поиска соответствующих участков сигналов в разных измерениях. Алгоритм поиска соответствий состоит в последовательном вычислении коэффициентов корреляции между кривыми. Величина сдвига отсчитывается от точки, в которой наблюдается максимум среди всех вычисленных коэффициентов корреляции в каждой паре сравниваемых сигналов. После нахождения максимума, вносится поправка в соответствующее измерение.

Корреляция между сигналами прямо пропорциональна степени схожести между ними. Для ее увеличения сигналы предварительно сглаживаются. Иными словами, устраняются *случайные ошибки* в поведении сигнала, которые возникают вследствие особенностей его распространения во внешней среде, точности измерения на приемнике, экранирования и тд. (Рис 2.4).

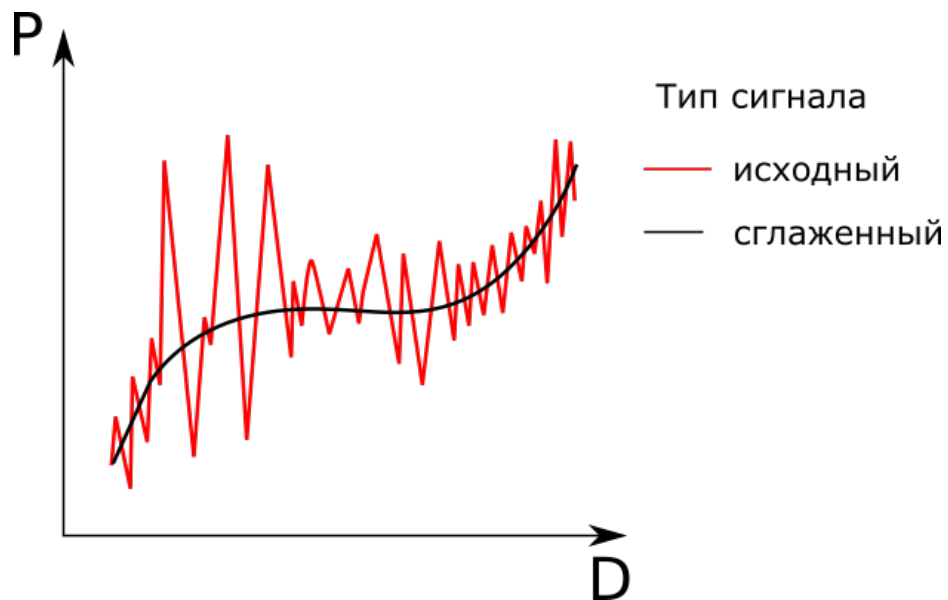


Рисунок 2.4 — Устранение шума

Для выделения общего тренда, шум «фильтруется». Для устранения характерных «всплесков» традиционно используют *медианные фильтры*. Их основная особенность - минимальное влияние на исходно «гладкие» сигналы. Это позволяет использовать такие фильтры без риска потери данных для сигналов, обрабатываемых на разных датчиках. Используют алгоритмы сглаживания более высокой сложности, наиболее популярными из которых являются фильтр Калмана[29] и многочастичный фильтр[37].

Альтернативным подходом к выделению общего тренда функции является аппроксимация. В случае с цифровым сигналом, при аппроксимации подбирается полином, описывающий ее наилучшим образом. Подбор полинома может быть произведен по методу наименьших квадратов, в результате чего его степень будет определяться минимальной суммой квадратов отклонений от аппроксимирующей функции (2.6).

$$\begin{cases} F = Ax^n + Bx^{n-1} + \dots + Mx + L \\ [pVV] = \min \end{cases} \quad (2.6)$$

где:

F – аппроксимирующая функция

A, B, \dots, L – коэффициенты полинома

x – переменная

$[pVV]$ – сумма квадратов отклонения исходной функции от аппроксимирующей

Однако изучив принцип по-которому происходит изменение сигнала во время движения поезда на линейных участках метрополитена, степень функции можно определить априори. Так как поезд движется прямолинейно и станции сотовой сети расположены относительно друг друга достаточно часто, то можно предположить, что во всех случаях поезд будет приближаться к БС до тех пор, пока расстояние между ними не будет минимально, а затем отдаляться. Сила сигнала при этом будет последовательно возрастать, достигнет точки мак-

симума, а затем будет убывать. Следовательно, в этом случае функция, описывающая сигнал имеет параболический вид, а степень полинома равна 2 (2.7).

$$\begin{cases} F = Ax^2 + Bx + C \\ [pVV] = \min \end{cases} \quad (2.7)$$

Совокупность сглаженных сигналов от всех видимых БС на перегоне является шаблоном, описывающим один линейный участок(перегон) сети метрополитена. Совокупность шаблонов будет составлять базу данных, являющейся основой для алгоритма позиционирования.

2.3.4 Он-лайн фаза. Алгоритм позиционирования

После того как база шаблонов готова, можно приступить к разработке алгоритма определения местоположения. Как отмечалось, его сущность сводится к сопоставлению участка данных, собранного в он-лайн режиме с базой шаблонов. Основная задача – установить методику, по которой будет происходить процесс идентификации. Для этого сначала необходимо определиться, какой конечный результат будет считаться удовлетворительным. В первом приближении точности позиционирования можно разбить на три класса, начиная с наиболее низкого: *перегон*, *участок* перегона и *точка* на перегоне. Помимо точности, качество алгоритма будет также определяться временными затратами. Точность и время на обработку в свою очередь зависят от:

1. Количества сот покрывающих перегон.
2. Количества БС, пойманных за промежуток времени t .
3. Характера сигнала от каждой БС.

ШАГ 1. *Выбор всех собранных БС за промежуток времени t_1 из базы шаблонов.* Возможны две ситуации: только один текущий перегон описывается уникальным набором из n пойманных станций или таких перегонов m штук. Первая ситуация дает возможность грубо определить текущее местоположение. В остальных случаях выборку необходимо сужать.

ШАГ 2. *Определение характера кривых из наборов данных за промежутки времени t_1 и t_2 и его сравнение с базой данных шаблонов.* Рассмотрим идеальный случай, при котором перегон был определен на предыдущем шаге. После однозначной идентификации перегона, необходимо определить на каком участке находится объект. Этого можно добиться на основании характера сигнала:

- **Возрастает:** начало перегона²
- **Практически не меняется:** середина перегона
- **Убывает:** конец перегона

²С практической точки зрения вернее говорить не о перегоне, а об участке перегона, который описывается набором БС. Однако для простоты понимания алгоритма будем считать, что описывается целый перегон.

Основной проблемой определения характера сигнала на коротком промежутке времени является шум. Для простоты эксперимента³, использовался следующий подход. Вначале шум устраняется при помощи уже упомянутой аппроксимации. Затем, данные собранные за первые t_1 сек., за вторые t_2 сек. и за общее время $t_1 + t_2$ сек. сравнивались между собой. Если во всех случаях характер кривой совпал, значит он был определен верно. Если нет – сбор данных необходимо продолжать. При удачном раскладе участок на перегоне будет определен за $t_1 + t_2$ сек..

Однако существует неоднозначность, связанная с количеством активных БС: если перегон покрывает лишь одна станция, то аналогичная ситуация возникнет и на параллельном ему. Это приводит к тому, что направление движения по такой схеме определить нельзя. Поэтому активных станций должно быть не менее двух – только в этом случае перегон будет определен однозначно.

Шаг 3. Определение характерных точек. Наиболее удачные случаи: попадание в набор данных точек пересечения сигналов с различных БС; появления новой БС; потеря сигнала одной из БС. В этом случае можно определить текущее местоположение на перегоне с максимальной точностью.

В более формальном виде, алгоритм позиционирования представлен на Рис. 2.5).

³Применение более сложных фильтров будет рассмотрено в последующих работах.

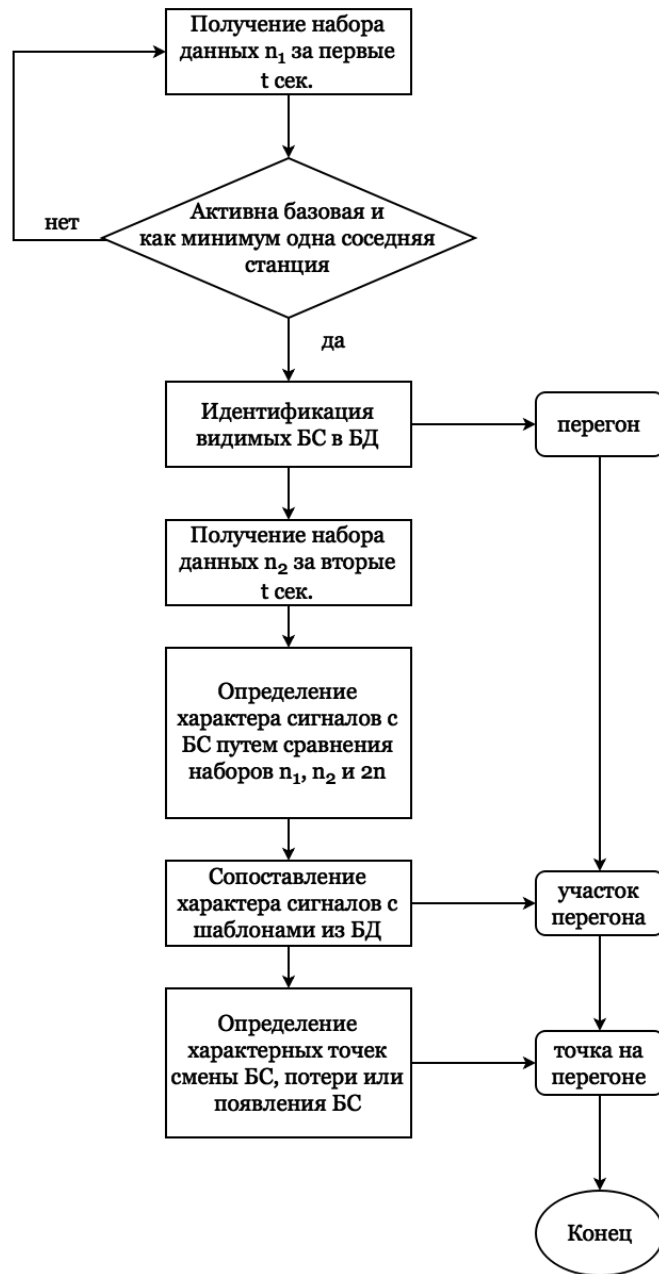


Рисунок 2.5 — Он-лайн фаза позиционирования

2.4 Математическая оценка алгоритма позиционирования

Для оценки точности позиционирования, алгоритмическая часть приложения сначала создается на стационарной машине. Оценка производится следующим образом. За исходные данные принимается таблица с географически привязанными сырыми данными. Затем происходит «разбиение» данных на основное и тестовое множества. Тестовое множество заменяет собой набор перегонов, полученных в он-лайн режиме. Из них случайным образом выбирается один перегон и точка на нем, которая в сущности является текущим местоположением пользователя. Далее происходит имитация сбора данных: начиная от исходной точки, вы-

бираются участки данных размером в t сек., и последовательно подставляются в алгоритм позиционирования аналогично тому, как пользователь движется в поезде метрополитена. После завершения алгоритма, выдается три параметра: количество соседних станций на выбранном прегоне, затраченное время на позиционирование и плановая точность определения местоположения. После проведения серии экспериментов вычисляются среднестатистические значения этих параметров и делаются соответствующие выводы. Если результаты удовлетворительны, то алгоритм можно добавлять к интерфейсной части мобильного приложения.

Глава 3. Сбор и анализ данных

Помимо того, что данные по метрополитену являются основой для позиционирования, они также уникальны в своем роде: аналогичных проектов, распространяемых под открытой лицензией, в России не было до сих пор. Это дает возможность использовать данные по сотовой сети, состоянию магнитного поля, зашумленности и тд. в других разработках. Более того, описанная технология сбора и сервис предварительной обработки данных дают возможность собирать данные самостоятельно и получать географически корректные и привязанные данные.

3.1 Технология сбора данных

Первый шаг – организация сбора данных. Для этого должны быть определены:

- Аппаратная часть
- Программное обеспечение
- Технология сбора

В силу принятой концепции «минимизации финансовых вложений», в качестве аппаратуры использовались мобильные устройства(смартфоны) любых производителей. Современные смартфоны позволяют не только принимать данные с разных источников, но и предоставляют возможность доступа к этим данным посредством API. Однако при использовании разных моделей, в первую очередь приходится учитывать особенности их операционной системы. Так, модели iPhone не предоставляют открытого доступа к собираемым данным. Некоторые модели Huawei(было отмечено на HUAWEI HN3-U00) не дают возможности получения RSS сотового сигнала. В телефонах компании Samsung нет информации о соседних вышках. Немаловажную роль играет и аппаратура, которая в зависимости от модели также будет давать разные результаты.

Исследовав особенности смартфонов, было принято решение подбирать программное обеспечение для сбора и обработки данных под операционную систему Android. При выборе программного обеспечения учитывался ряд критериев, таких как возможности логгирования, удобного представления собираемых данных, расстановки дополнительных меток из текстового файла и пр.[52]. Так как программы, удовлетворяющей всем требуемым критериям не было найдено, компанией NextGIS было создан собственный продукт «Nextgis Logger». Приложение позволяет собирать данные с внешних источников, таких как ГНСС, GSM, bluetooth и др., а также с собственных датчиков: акселерометр, гироскоп, магнетометр и пр. Данные логгируются в двух режимах: непрерывный автоматический сбор с определенных пользователем источников и дискретное внесение отметок, контролируемое пользователем.

Общая технология сбора данных в метрополитене состоит в следующем:

1. Подготовка файла с марками(станциями метрополитена) и его загрузка в «Nextgis Logger».
2. Выбор необходимых источников данных для логгирования(Рис. 3.1).

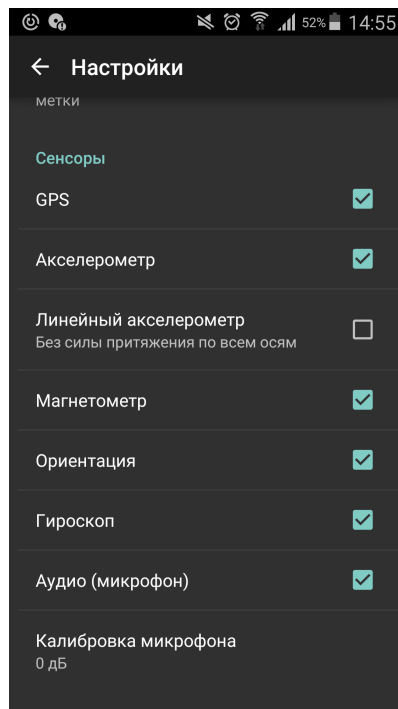


Рисунок 3.1 — Интерфейс «NextGISLogger». Выбор доступных устройств.

3. Инициализация логгера и расстановка меток в контрольных точках начала движения, максимального разгона, начала торможения и полной остановки(Рис. 3.2).

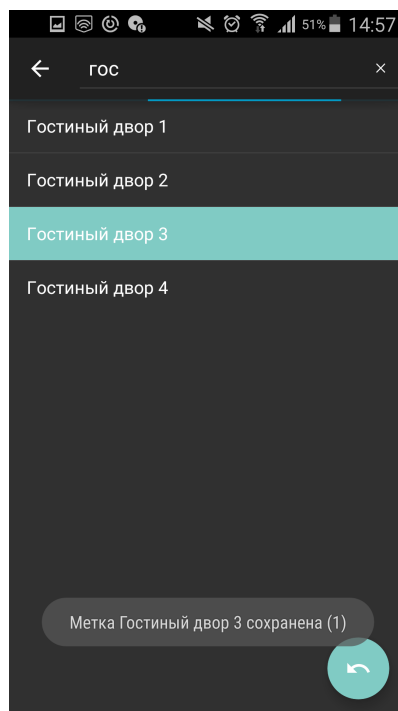


Рисунок 3.2 — Интерфейс «NextGISLogger». Расстановка меток.

4. Проверка текущего состояния по интересующим параметрам(Рис. 3.3).



Рисунок 3.3 — Интерфейс «NextGISLogger». Текущие данные по сотовой сети.

5. Сохранение сессии по окончании сбора и отправка архивированных логов на сервер обработки

Как видно, технология сбора данных достаточно простая и не требует специализированных знаний и подготовки. Однако для создания полной и качественной базы данных по метрополитенам в разных городах для каждого поколения и оператора сотовой сети, силами одного-двух пользователей обойтись достаточно сложно. Возможное решение – краудсорсинг. Его применение может быть выгодно пользователям, для которых важно иметь качественную и актуальную базу данных. При таком подходе потребуется приложение, позволяющее проверять состояние базы данных.

3.2 Мониторинг состояния БД

Для оперативного отслеживания покрытия GSM-данными по метрополитену пользователю важно знать, куда прокладывать маршрут и что представляют из себя собранные данные. *Были ли допущены ошибки в процессе сбора данных?* Если на некотором участке метки были расставлены некорректно, то на него необходимо вернуться и осуществить сбор заново. *Обеспечен ли данными тот или иной участок перегона?* В противном случае позиционирование на нем невозможно. *Корректны ли данные?* Доверять данным можно только после проведения серии измерений. Поэтому для оператора важно знать количество проездов по перегонам и насколько измерения из разных заездов коррелируют друг с другом.

Помимо оператора, который отвечает за сбор данных, информация важна в том числе и для администратора базы данных.

Ответы на вопросы могут дать веб-карты, обеспечивающие удобный и повсеместный просмотр, доступ к которым осуществляется через URL. Для создания веб-карт применяются веб-гис. В работе использовалась разработка компании Nextgis «NextGIS Web». Она позволяет добавлять слои векторных, растровых данных, подключать слои WMS, WFS. В ней также есть возможность соединения с базой данных, что позволяет отображать все изменения, происходящие в ней в он-лайн режиме (Рис. 3.4).

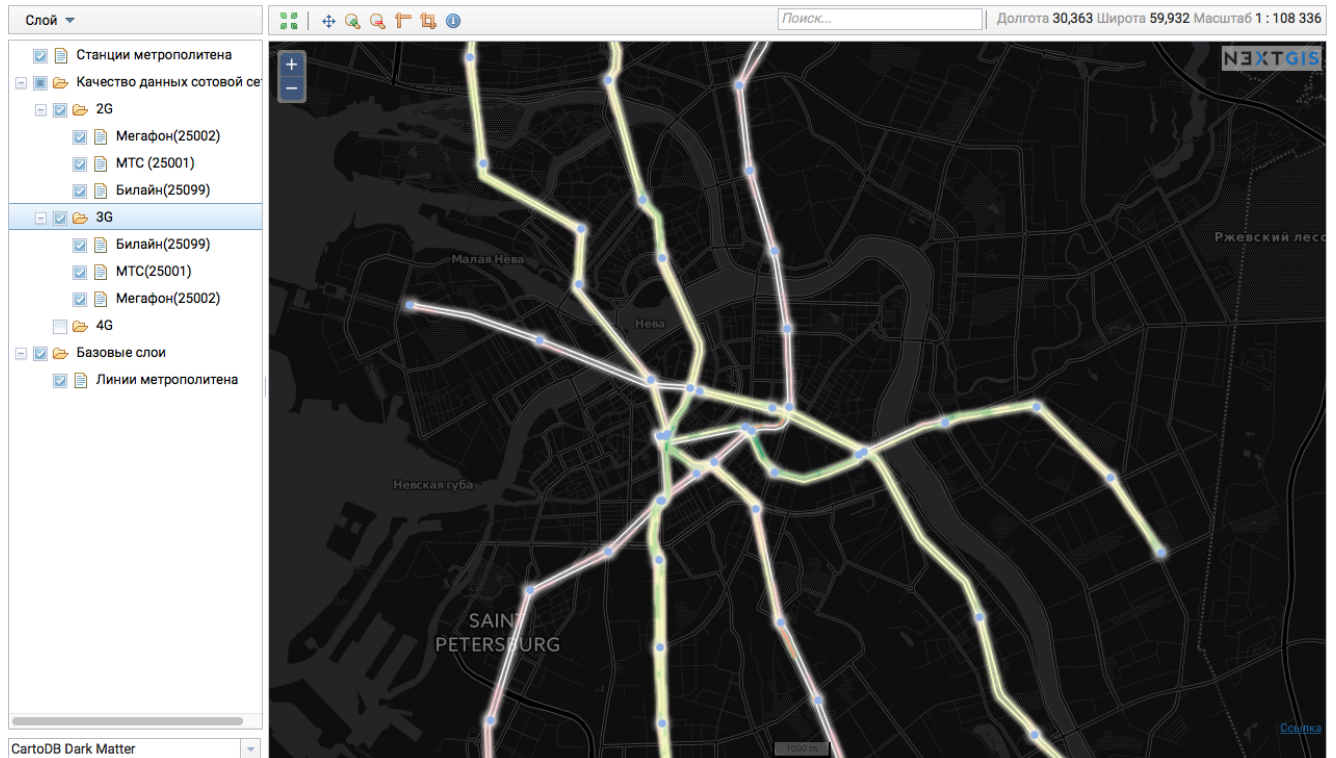


Рисунок 3.4 — Интерфейс NextGIS Web. Данные по метрополитену Санкт-Петербурга.

Глава 4. Разработка программного обеспечения

После того, как данные собраны, можно приступать к созданию программной части по их обработке. Она состоит из двух блоков: блок создания и обработки базы данных на серверной стороне и блок позиционирования, который тестируется на серверной и реализуется на клиентской стороне. Первый блок включает создание базы данных, ее наполнение, нормализацию, графическую и картографическую визуализацию. Блок позиционирования состоит из разработки собственно модулей позиционирования и математической оценки их точности.

4.1 Создание и обработка базы шаблонов.

После завершения работы по сбору данных, оператор отправляет их на сервер-хранилище. Он в свою очередь связан с сервером обработки данных, который с заданной периодичностью запрашивает информацию о поступлении новых данных. При появлении таковых инициализируется цепочка обработки. Центральное звено в ней – наполнение БД. Его основная задача – привести сырые данные к географически привязанным шаблонам. Он состоит из нескольких блоков модулей.

Блок 1. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ. Как упоминалось в предыдущей главе, сбор данных выполняется в двух режимах: логгирование с датчиков (автоматический режим) и расстановка меток (ручной режим). Метки – основа для географической привязки логов. Чтобы осуществить привязку, логи и метки необходимо сопоставить в единую структуру. Для этого используется уникальное поле временной отметки. Так как оба режима используют часы с одного устройства и работают синхронно, то можно его использовать для сортировки. (Рис. 4.1).

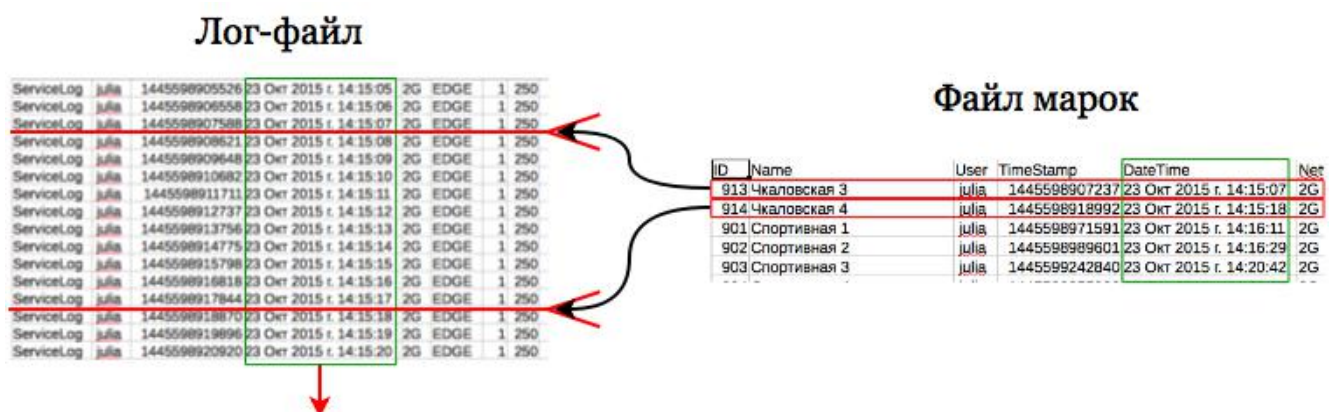


Рисунок 4.1 — Разработка ПО. Сопоставление данных по временным отметкам

На перегонах и станциях используются разные способы позиционирования. Поэтому отсортированным данным необходимо присвоить состояние: остановка, переход или движение (см. главу 1). Для этого используется последовательность ввода меток на станциях (Рис. 4.2). Так как метки собираются в ручном режиме, возможны ошибки оператора. Поэтому здесь же путем сравнения со «словарями» (графы возможных переходов на станциях и перегонов на линиях), проверяется правильность последовательности ввода меток.

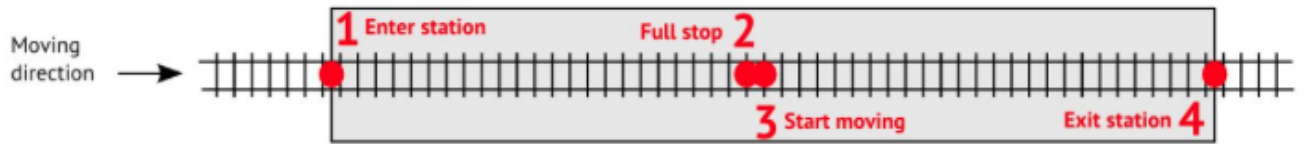


Рисунок 4.2 — Разработка ПО. Расстановка меток

В процессе единовременного сбора данных с нескольких устройств метки могут расставляться на одном базовом устройстве. Для получения недостающих файлов, метки создаются на основе базовых с учетом временной поправки. Методика сбора данных в этом режиме подразумевает единовременную инициализацию сессий на всех устройствах (Рис. 4.3).

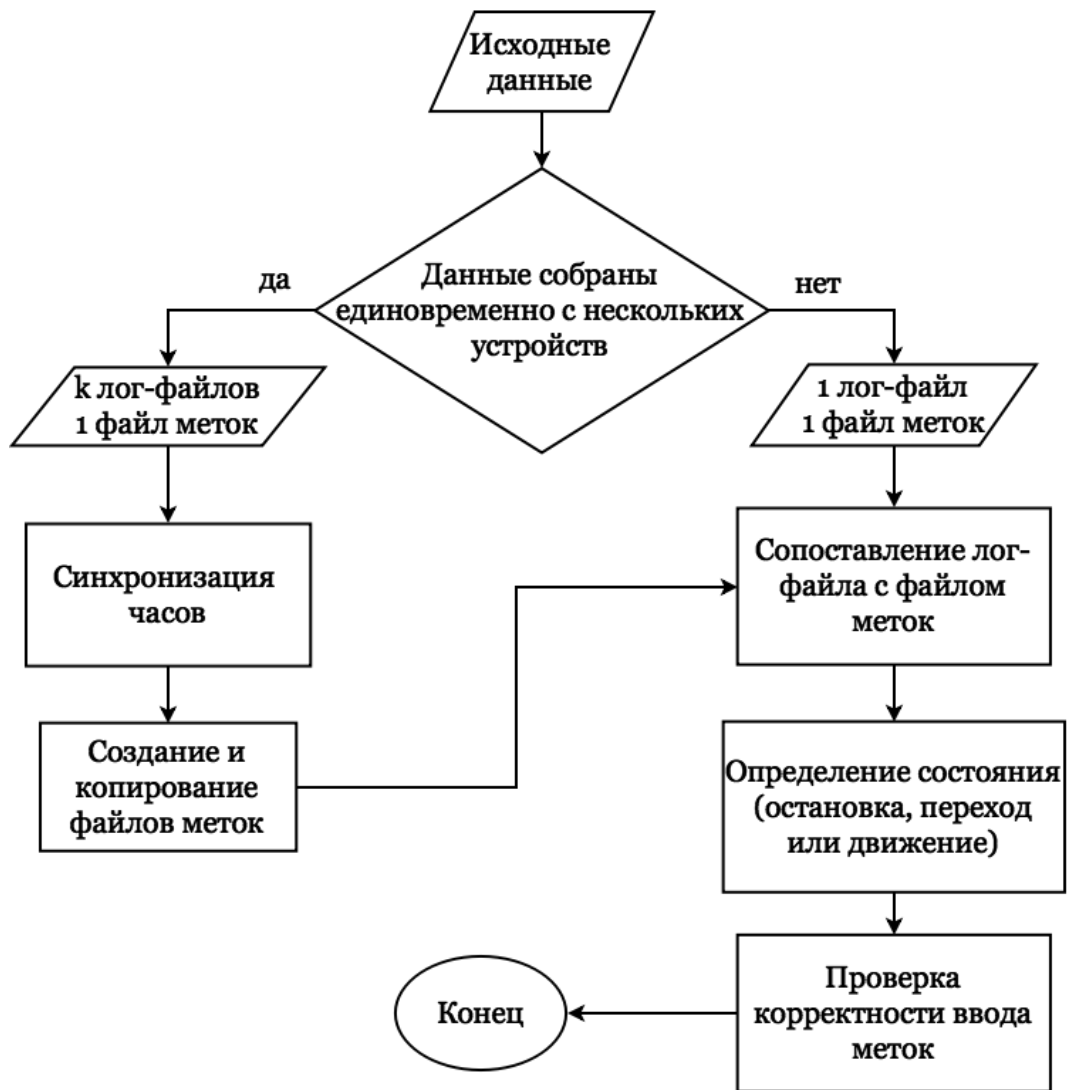


Рисунок 4.3 — Интерпретация и валидация исходных данных.

Блок 2. ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА. На следующем этапе каждую запись пре-
добработанного лог-файла можно географически привязать. Для этого исходные данные
разбиваются на перегоны. Для каждого перегона рассчитываются параметры движения по-
езда по формуле 2.3. Затем для каждой точки перегона находится время в пути, начиная с
предыдущей станции. Полученное значение используется для привязки при помощи линей-
ной интерполяции (Формула 2.4). После завершения привязки каждая точка будет помещена
в координатное пространство базовых слоев линий и станций метрополитена (Рис. 4.4).

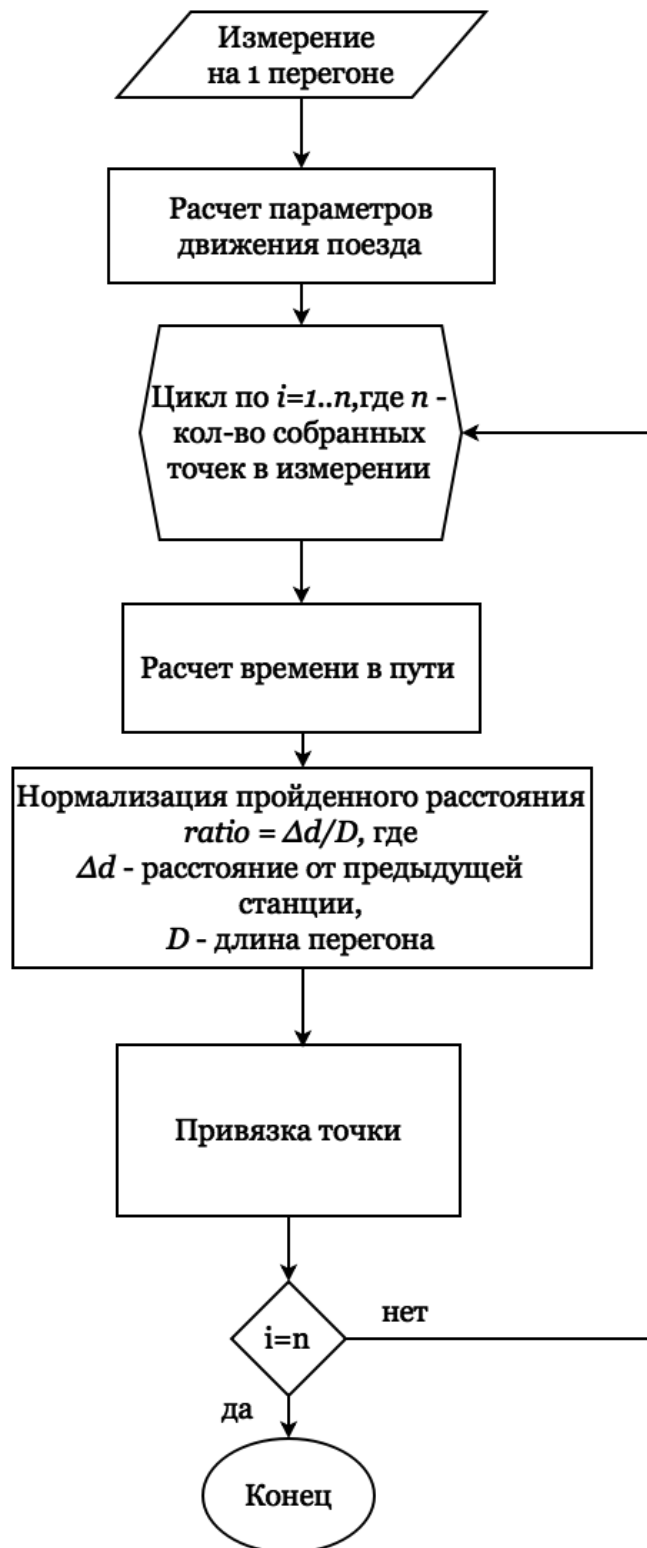


Рисунок 4.4 — Привязка точек на перегоне

Блок 3. Аппроксимация. Согласно принципам анализа данных, их форма представления должна быть не только текстовая, но и графическая. Она позволяет увидеть особенности исследуемого явления и выявить зависимости, трудно воспринимаемые при анализе текста. Применительно к искомой задаче, необходимо проанализировать поведение сигнала на линейных участках сети метрополитена. В качестве такого участка берется перегон между двумя соседними станциями (Рис. 4.5).

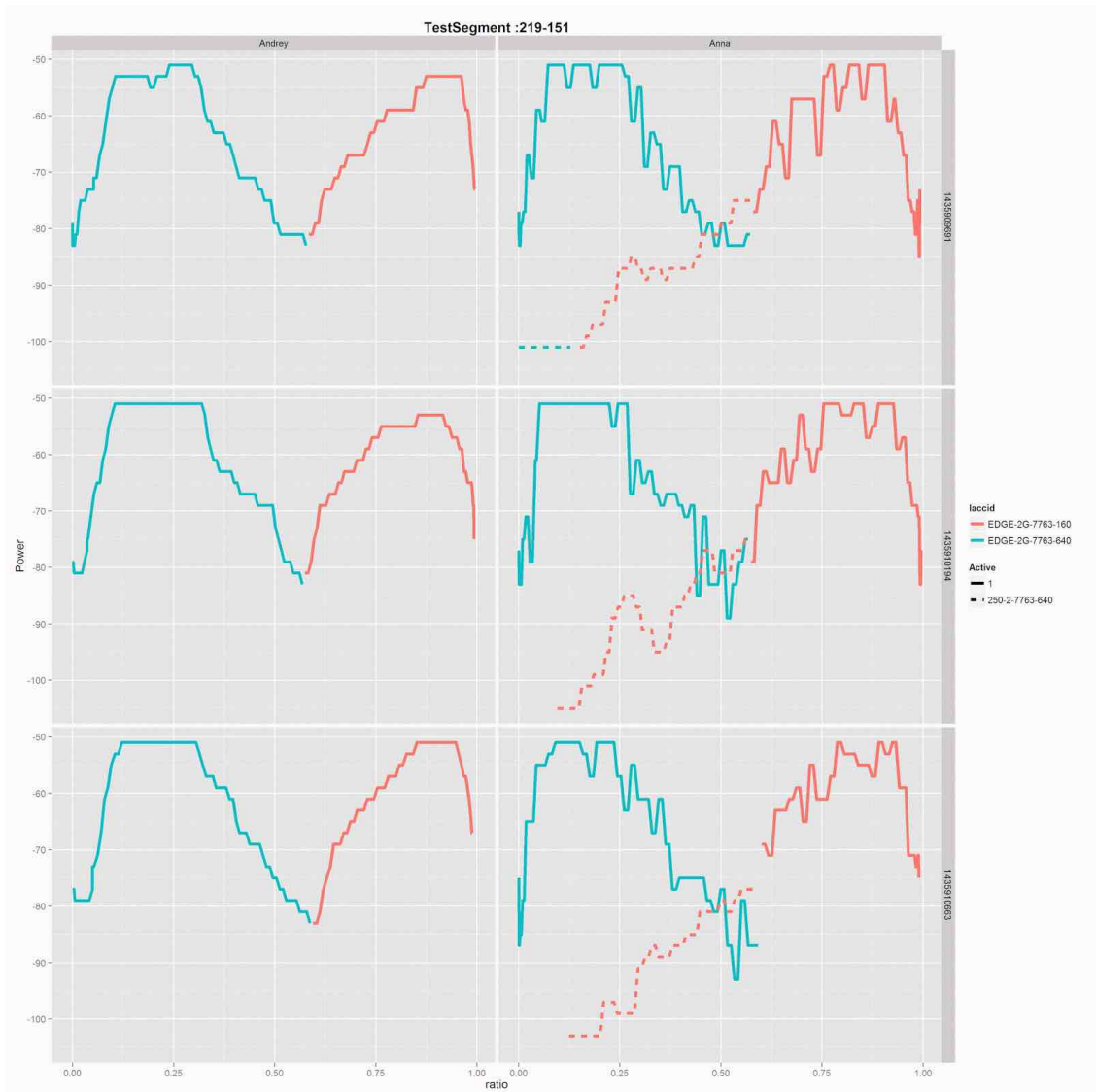


Рисунок 4.5 — Поведение сотовых сигналов на тестовом перегоне. Геопривязанные данные.

На Рис. 4.5 показан перегон «Сретенский Бульвар – Курская» Московского метрополитена. Сотовый сигнал передается от вышек сотовой сети 2G оператора «Мегафон». Данные собирались с двух устройств одновременно несколькими измерениями: в левой колонке представлены графики с мобильного телефона модели «Samsung», в правой – «Sony». На перегоне проведено три заезда(три измерения): каждый заезд – строка на графике. Цветом выделены сигналы, получаемые с разных вышек. Сплошная структура линий показывает, что сигнал принимается с базовой станции, а пунктирная – с соседней. Ось абсцисс показывает расстояние от станции отправления, а ось ординат – силу сигнала в дБ.

Из графика видно, что:

- **Общее поведение сигнала не меняется со временем**, что можно проследить сравнивая сигналы из разных измерений. Наблюдая подобную картину на выборке из других перегонов, можно отметить, что данные, собранные в определенный момент времени будут актуальны и в будущем(с учетом особенностей, указанных в главе 1).
- **Общее поведение сигнала не меняется в зависимости от модели телефона.** С одной стороны общая тенденция остается неизменной. Это позволяет использовать

разные устройства для наполнения базы данных измерениями. Однако стоит отметить, что **у разных моделей различная степень фильтрации шума**. На данном графике четко видно, что «зашумленность» сигнала у модели Sony значительно выше, чем у модели Samsung.

- **Модель Samsung не предоставляет данных по соседним вышкам.** В один и тот же момент времени Samsung ловит сигнал только с базовой станции, тогда как Sony в том числе и с соседней. Так как с увеличением количества вышек, сигнал от которых принимается в определенный момент времени, увеличивается информативность создаваемого шаблона, этот факт будет накладывать определенные ограничения для работы алгоритма позиционирования на модели Samsung.
- **Существует сдвиг по оси абсцисс, вызванный ошибкой привязки данных.** В основном сдвиг возникает вследствие принятой аппроксимации движения поезда. Для уменьшения ошибки при уравнивании, сдвиг необходимо устранить.

Перечисленные особенности послужили основой для разработки алгоритма уравнивания географически привязанных данных. В его задачи входит:

- **Минимизировать влияние зашумленности сигнала.** Так как степень зашумленности зависит от модели телефона, то алгоритм минимизации должен работать таким образом, чтобы «зашумленные» сигналы фильтровать с высокой степенью, при этом не оказывая сильного влияния на визуально «гладкие» сигналы. В качестве такого алгоритма используется медианный фильтр.
- **Устранить ошибки привязки данных.** После применения медианного фильтра схожесть сигналов с разных устройств увеличивается. Это позволяет сравнивать участки сигналов для нахождения ошибки сдвига (Рис. 4.6).

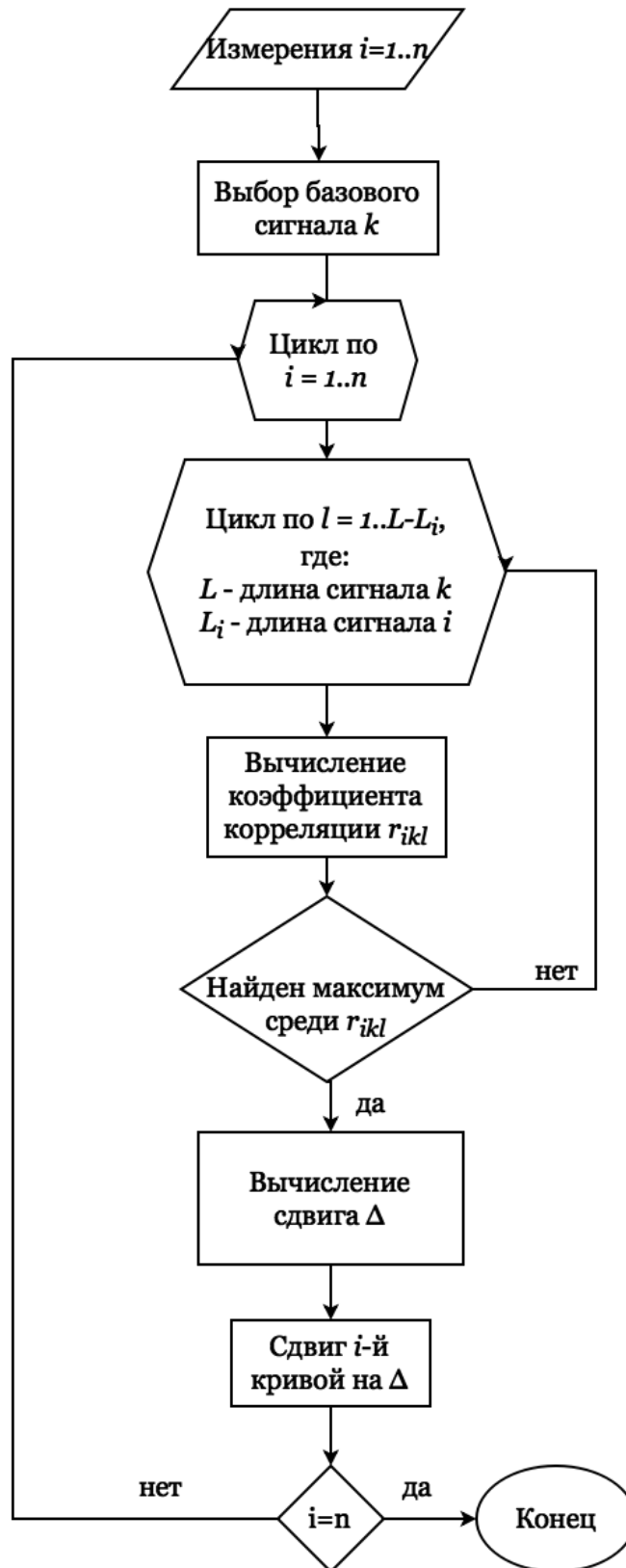


Рисунок 4.6 — Алгоритм устранения ошибки за привязку данных

– Усреднить сигналы.

Поведение кривых в процессе уравнивания можно также проследить графически. Устранение ошибки привязки происходит в два этапа. На первом этапе находятся соответствия в рамках одного заезда (Рис. 4.7).

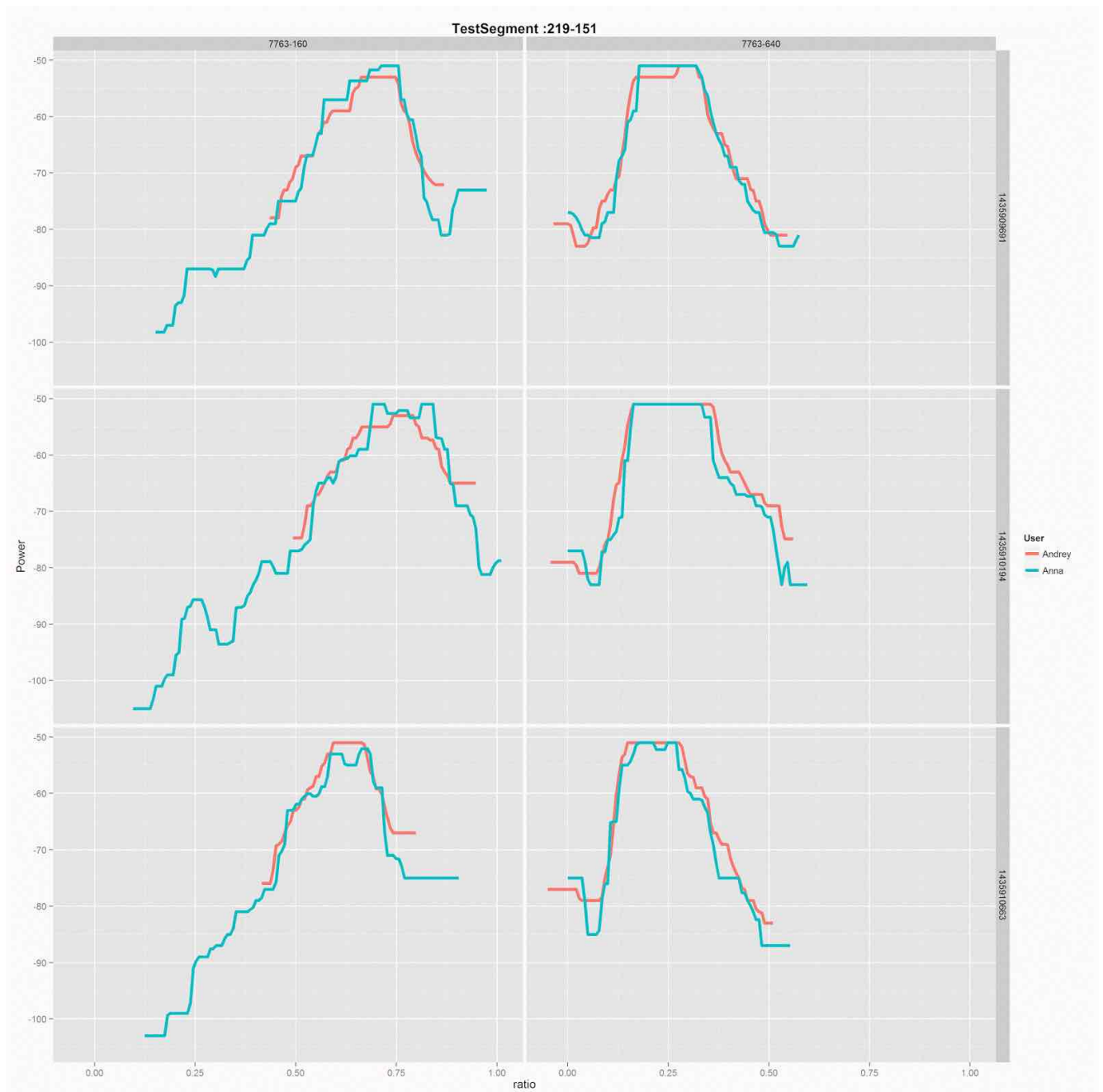


Рисунок 4.7 — Поведение сотовых сигналов на тестовом перегоне. Сдвиг сигналов по устройствам.

На Рис. 4.7 каждая колонка – сигнал принимаемый от конкретной станции сотовой сети. Цветом показаны устройства, принимающие сигнал, в строках, по аналогии с Рис. 4.5 показаны заезды.

Видно, что для сигналов, принятых на разных устройствах взаимное соответствие было найдено. Второй этап – устранение ошибок в рамках заездов(Рис. 4.8).

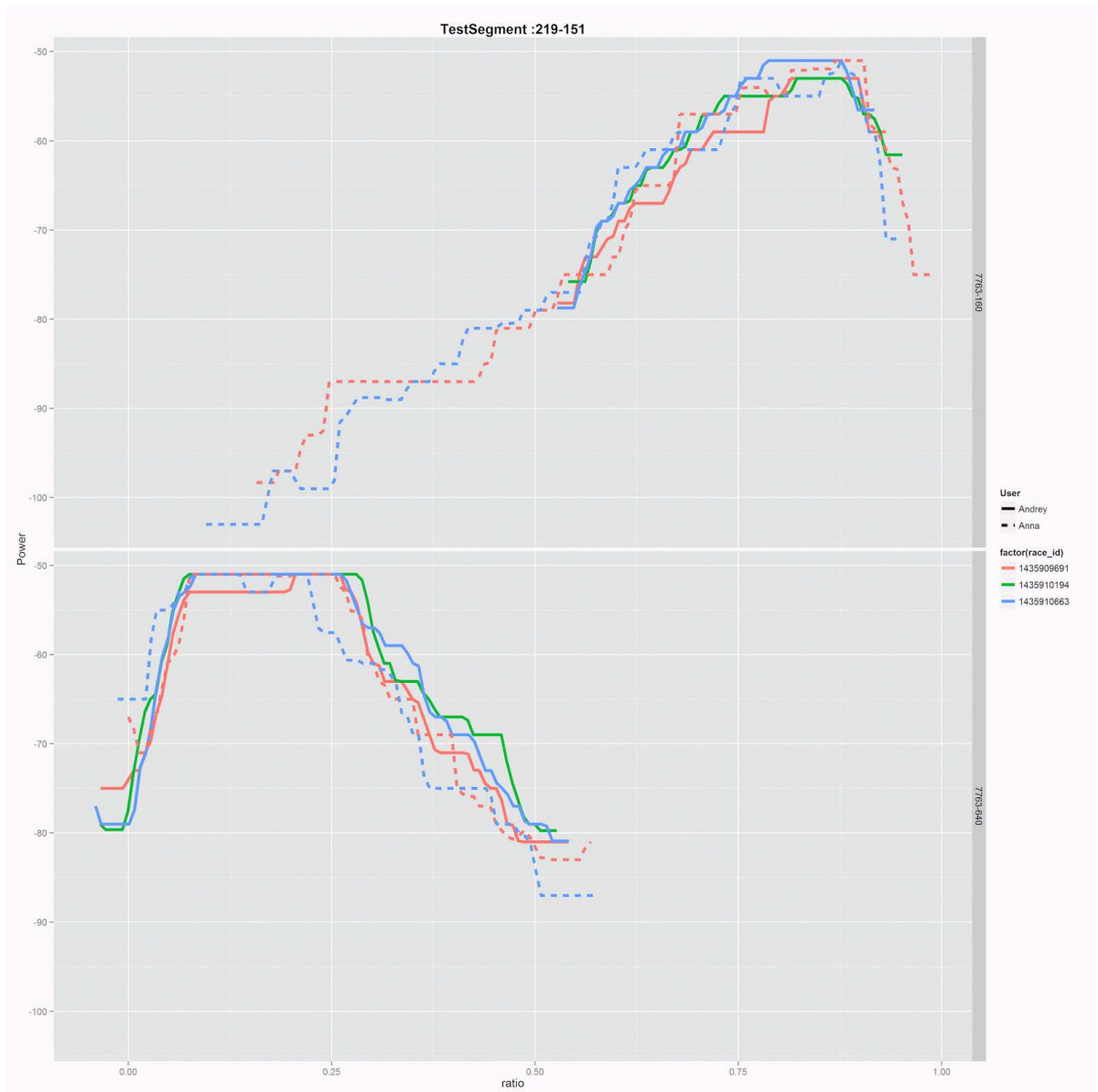


Рисунок 4.8 — Поведение сотовых сигналов на тестовом перегоне. Сдвиг сигналов по заездам.

Каждая строка графика – станция сотовой сети. Цветом обозначено сочетание "пользователь-заезд".

Из графика видно общее поведение сигнала для каждой станции. Также наблюдаются его локальные флуктуации, которые устраняются на последнем шаге фильтрации сигнала в соответствии с формулой 2.7.

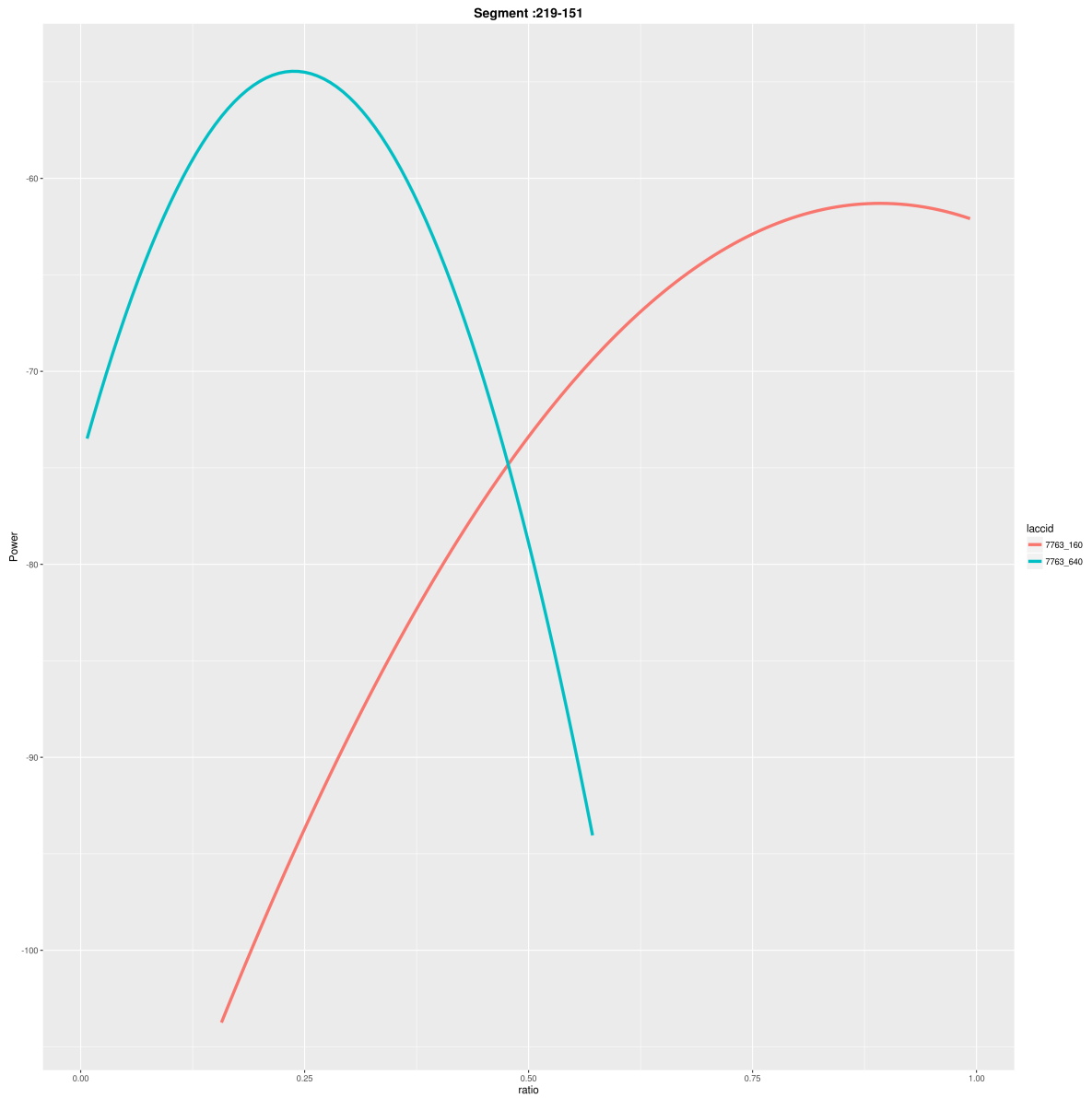


Рисунок 4.9 — Поведение сотовых сигналов на тестовом перегоне. Сглаженные сигналы.

После завершения каждого этапа нормализации, результат сохраняется в базу данных. В структуру базы данных входят:

- Данные по метрополитену. Это геоданные, включающие линейный слой линий и точечный слой станций метрополитена¹, а также графы возможных перегонов и переходов на узловых станциях.
- Исходные данные и состояние их обработки.
- Предобработанные данные
- Привязанные данные
- Уравненные данные
- Анализ уравненных данных
- Представления для визуализации выходных геоданных (Рис. 4.10).

¹Данные подготовлены компанией NextGIS

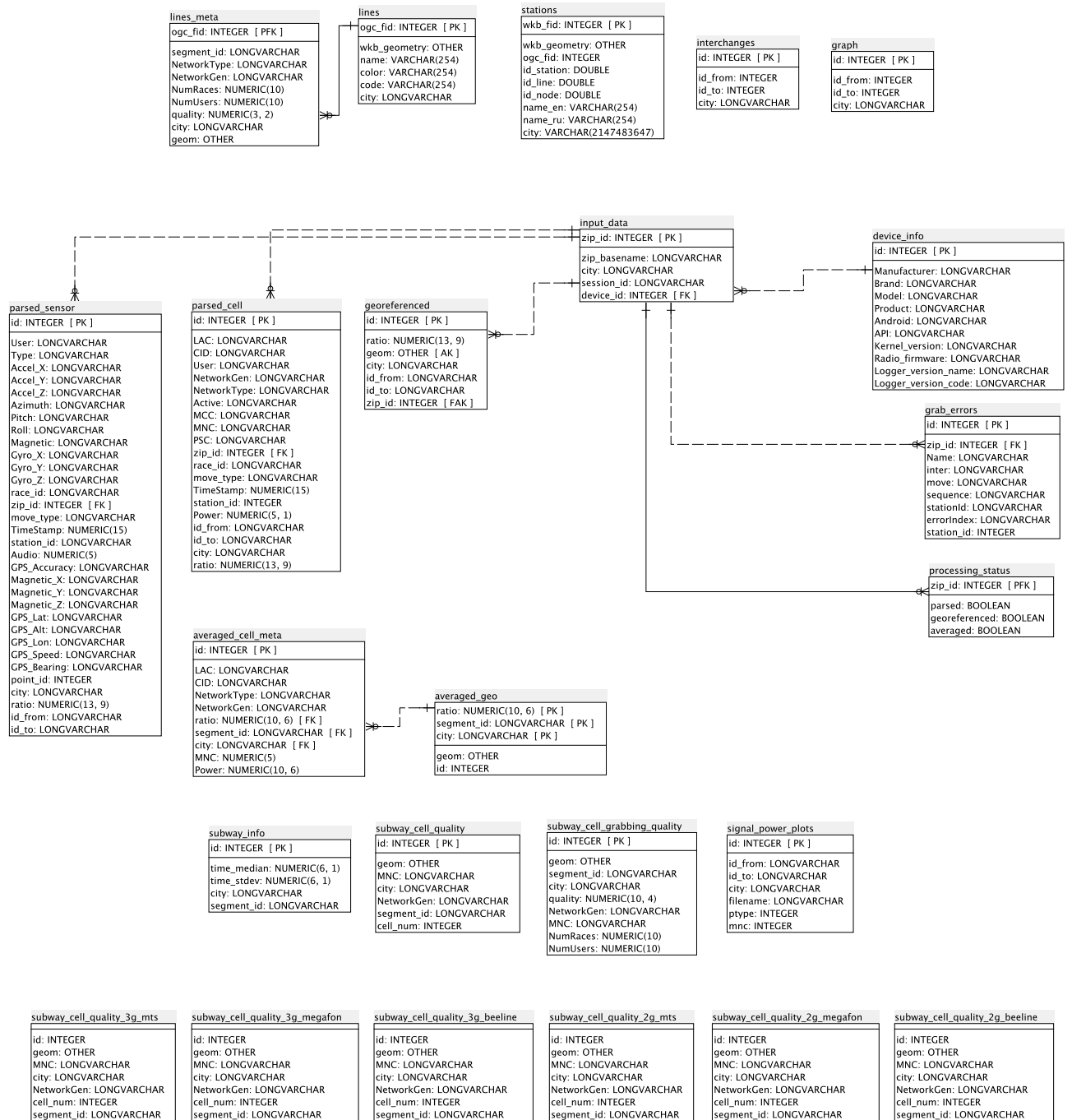


Рисунок 4.10 — Структура базы данных

4.2 Программное обеспечение для обработки данных

В качестве языка программирования для ядра системы был выбран Python. Обладая обширным набором открытых библиотек по анализу данных(`numpy`,`scipy`,`pandas`), работе с гео данными(`shapely`), интеграцией с базой данных(`sqlalchemy`,`psycopg2`) язык позволяет экономить времени, требуемое на разработку стандартных функций.

База шаблонов создавалась при помощи СУБД PostgreSQL. Причина такого выбора – ее интеграция с расширением для хранения в базе и географических данных их обработки PostGIS. Несомненным преимуществом этой СУБД также является ее производительность, а также поддержка объектно-ориентированного и реляционного подхода к базам данных.

Для графической визуализации использовался язык программирования R. Будучи самым востребованным инструментом в анализе данных, R обладает мощным набором статистических функций, использование которых требует грамотного инструмента по визуализации данных. Таким является пакет ggplot2, который и послужил основой для построения графиков.

В связи с необходимостью публикации карт в Интернете, было принято решение использовать веб-гис NextGisWeb QGIS. Помимо интеграции с базой данных, NextGISWeb QGIS позволяет загружать картографические стили, подготовленные в настольной ГИС QGIS.

Все данные опубликованы в открытом доступе, программное обеспечение имеет открытый исходный код, а проект распространяется под открытой лицензией GNU GPL v2.

4.3 Мобильное приложение для позиционирования

Как упоминалось ранее, установка приложения возможна только на смартфоны с операционной системой «Android». После завершения установки на пользовательском телефоне, можно определять его местоположение. На текущем этапе отслеживание может происходить только на линейных участках сети: на станциях метрополитена местоположение будет определяться точкой в масштабе всей станции.

В базовом варианте, интерфейс приложения достаточно простой и включает в себя схему метро, кнопку инициализации и индикатор точности позиционирования (Рис. 4.11).

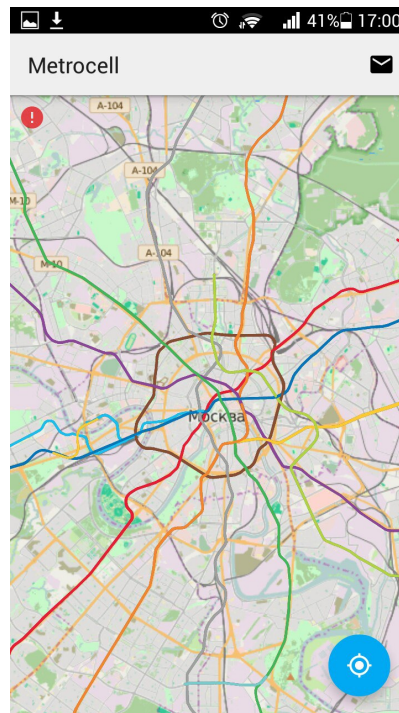


Рисунок 4.11 — Интерфейс NextGIS Metrocell

После нажатия кнопки инициализации начинается процесс сбора данных сотовой сети. После того, как получен первый сегмент данных длиной в t сек., начинается поиск соответствующего участка данных в базе шаблонов. По прошествии следующих t секунд происходит корреляция сигналов, результат которой позволяет оценить местоположение не только ограничиваясь каким-либо перегоном, но и участком на нем. В зависимости от промежуточного результата, каждые t секунд индикатор точности позиционирования обновляется. Если перегон не определен, то цвет остается красным, если определен – оранжевым. Как только определен участок перегона, цвет меняется на желтый. И, наконец, когда определена точка на перегоне индикатор принимает зеленый цвет.

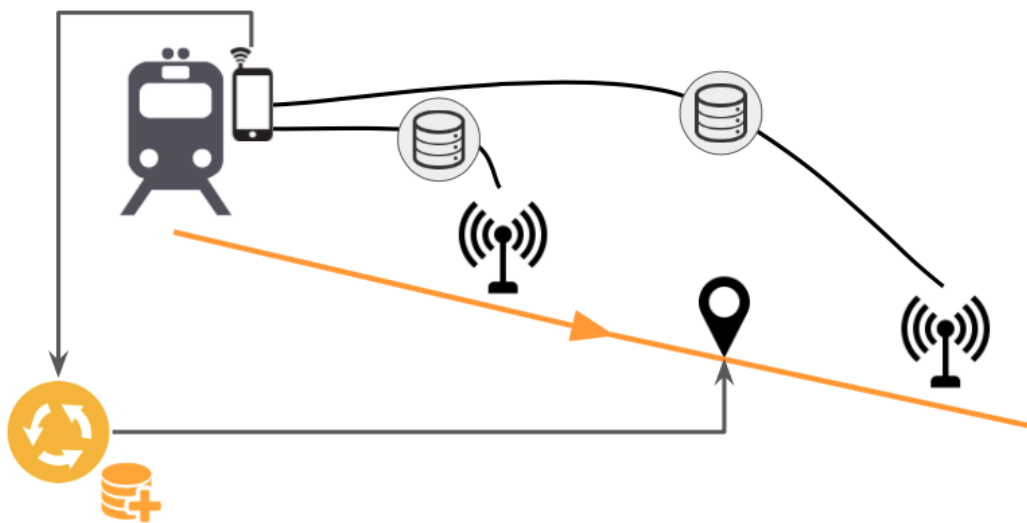


Рисунок 4.12 — Он-лайн фаза позиционирования

Заключение

В ходе представленной работы был разработан прототип приложения, который позволяет определять местоположение в линейной сети по данным цифровой сотовой сети на примере метрополитена. Качественным усовершенствованием существующих аналогичных решений является использование изменения характера сигнала в процессе движения объекта. Для решения задачи был выбран наиболее устойчивый к влиянию случайных ошибок метод локализации по шаблону.

Результатами работы являются:

- Создана база данных по сотовым сетям метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга
- Составлена серия веб-карт для мониторинга текущего покрытия данными сотовой сети и оценки их качества
- Разработан прототип алгоритма позиционирования и проведена математическая оценка его точности

Дальнейшая работа включает:

- Создание мобильного приложения
- Практическую оценку качества алгоритма позиционирования
- Использование инерциальных систем для идентификации остановок поезда
- Упрощение методики сбора данных

Мобильное приложения для позиционирования в метрополитене в первую очередь может использоваться как дополнение к сервисам позиционирования на поверхности для непрерывной навигации. Отслеживание текущего местоположения – актуальная задача при перемещении в городах со сложной инфраструктурой городского транспорта. Он-лайн режим позволит жителям городов оценить временные затраты до прибытия в пункт назначения, а туристам найти интересные достопримечательности, рестораны, мероприятия и тд.

Полученные в ходе работы результаты позволяют рассчитывать на использование описанных подходов не только в метрополитене, но и в линейных сетях со схожей архитектурой.

Список сокращений и условных обозначений

ГНСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система

GSM – Global System for Mobile Communications (Глобальная система для мобильного общения)

ИНС – Инерциальная Навигационная Система

LPS – Local Positioning System (Локальная Система Позиционирования)

POA – Phase Of Arrival (Фаза приходящего сигнала)

TOA – Time Of Arrival (Время приходящего сигнала)

LAN – Local Area Network (Локальная беспроводная сеть)

WAN – Wide Area Network (Глобальная беспроводная сеть)

CPS – Cellular positioning system (Система позиционирования по станциям сотовой сети)

AP – Access Point (Точка доступа)

PDR – Pedestrian Dead Reckoning (Навигационное счисление пути)

MCC – Mobile Country Code (Мобильный код страны)

MNC – Mobile Network Code (Мобильный код сети)

LAC – Local Area Code (Код соты)

CID – Cellular Identifier (Идентификатор станции сотовой сети)

Список литературы

1. *Карлацук В. И., Карлацук С. В.* Спутниковая навигация. Методы и средства. — М. : СОЛОН-Пресс, 2006. — 176 с.
2. *Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., С. Т. В.* Геоинформатика (Классический университетский учебник). — М. : ИЦ Академия, 2005. — 480 с.
3. *Lin H., Batty M.* Виртуальные географические среды / под ред. В. С. Тикунов. — Краснодар : Краснодарская панорама досуга, 2015. — 352 с.
4. *Alshami I. H., Ahmad N. A., Sahibuddin S.* Dynamic WLAN Fingerprinting RadioMap for Adapted Indoor Positioning Model // Springer International Publishing Switzerland. — 2015.
5. *Кзаков Э. Э.* Краудсорсинг геоданных в России в мире // Сборник материалов международной научно-практической конференции. Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры. От идеи до внедрения. Т. 4 / под ред. О. А. Лазебник. — Санкт-Петербургский Государственный Университет. Спб. : Политехника, нояб. 2015. — С. 229—233.
6. *Jardak N., Samama N.* Indoor Positioning Based on GPS-Repeaters: Performance Enhancement using an Open Code Loop Architecture // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2009. — Янв. — Т. 45, № 1. — С. 347—359.
7. *Waqar W., Chen Y., Vardy A.* Smartphone positioning in sparse Wi-Fi environments // Computer Communications. — 2016. — Т. 73, Part A. — С. 108—117.
8. A Real-Time Location-Based Services System Using WiFi Fingerprinting Algorithm for Safety Risk Assessment of Workers in Tunnels / P. Lin [и др.] // Mathematical Problems in Engineering. — Beijing, 2014. — С. 1—10.
9. Positioning algorithms of underground coal mines based on virtual Radio-map and Markov chain / L. Cui L. and Li, J. He, M. Shi // Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition). — 2014.
10. *Щёкотов М. С., Кашевник А. М.* Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. — Спб., 2012. — С. 459—471.
11. *Pritt N.* Indoor location with Wi-Fi fingerprinting // 2013 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR). — Окт. 2013. — С. 1—8.
12. Performance and limits of KNN-based positioning methods for GSM networks over leaky feeder in underground tunnels / F. Pereira [и др.] // Journal of Location Based Services. — 2012. — Т. 6, № 2. — С. 117—133.
13. *Schiffbauer W. H.* Navigation and control of continuous mining systems for coal mining // IEEE. — 1996.

14. *Stockx T., Hecht B., Schöning J.* SubwayPS: Towards Smartphone Positioning in Underground Public Transportation Systems // Proceedings of the 22Nd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. — Dallas, Texas : ACM, 2014. — С. 93—102. — (SIGSPATIAL '14).
15. *Генике А. А., Побединский Г. Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — М. : Картгеоцентр, 2004. — 355 с.
16. ГОСТ Р 53611-2009. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения землемерных и землеустроительных работ. Общие технические требования. — М. : Стандартинформ, 2012. — 12 с.
17. *Курощев Г. Д.* Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования. — СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та., 2011. — 184 с.
18. *Kolodziej K. W., Hjelm J.* Local Positioning Systems: LBS Applications and Services. — CRC Press, 2006. — 488 pp.
19. *Bajers F.* Inertial Navigation System. — Denmark, Aalborg University, 2008. — 122 pp.
20. *Назаров А. С.* Фотограмметрия. — Минск : ТетраСистемс, 2006. — 400 с.
21. *Курощев Г. Д.* Геодезия и география. — СПб : Изд-во С.-Петерб. ун-та., 1999. — С. 372.
22. *Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.* GPS Accuracy. — URL: <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>.
23. *Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения.* История развития ГЛОНАСС. — URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/>.
24. European Space Agency. What is Galileo? — URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo.
25. Beidou Navigation Satellite System. Development Process. — URL: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/20121214e14a946961514cce98ab04d876258343.html>.
26. *Namiot D.* On indoor Positioning // International Journal of Open Information Technologies. — 2015. — Т. 3.
27. *Mahamud M. A., Chowdhury M.* Indoor Location System with Wi-Fi and Alternative Cellular Network Signal // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. — 2015. — Т. 10, № 3. — С. 59—70.
28. *Namiot D.* Context-Aware Browsing – A Practical Approach // 2012 Sixth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. — Сент. 2012. — С. 18—23.
29. *Pahlavan K., Li X., Makela J. P.* Indoor geolocation science and technology // IEEE Communications Magazine. — 2002. — Февр. — Т. 40, № 2. — С. 112—118.
30. *Рутледж Д.* Энциклопедия практической электроники. — М. : ДМК-Пресс, 2002. — 528 с.

31. Using Wi-Fi/magnetometers for indoor location and personal navigation / Y. Li [и др.] // . — 2015.
32. GSM RSSI-based positioning using extended Kalman filter for training artificial neural networks / K. Anne [и др.] // . Т. 60. — 2004. — С. 4141—4145.
33. *Бабеев* iBeacon: Мифы и реальность. — 2016. — URL: <https://habrahabr.ru/post/278689/>.
34. An ibeacon primer for indoor localization / P. Martin [и др.] // . — 2014. — С. 190—191.
35. *Holm S.* Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength // . — 2012.
36. A Reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors / F. Li [и др.] // . — 2012. — С. 421—430.
37. *Harle R.* A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians // IEEE Communications Surveys and Tutorials. — 2013. — Т. 15, № 3. — С. 1281—1293.
38. *Haas H.* Wireless data from every light bulb. — URL: http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb.
39. *Sharma R. R., Raunak, Sanganal A.* Li-Fi Technology. Transmission of data through light.
40. *Yoshino M., Haruyama S., Nakagawa M.* High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor // . — 2008. — С. 439—442.
41. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication / S.-H. Yang [и др.] // Electronics Letters. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 54—56.
42. Indoor positioning system using geomagnetic anomalies for smartphones / S.-E. Kim [и др.] // . — 2012.
43. *Намиот Д. Е.* Использование двумерных штрих-кодов для создания системы позиционирования и навигации в помещении // Прикладная информатика. — 2013. — С. 31—39.
44. A Hybrid WiFi Magnetic Matching PDR Approach for Indoor navigation with smartphone / Y. Li [и др.] // IEEE COMMUNICATIONS LETTERS. — 2016. — Т. 20, № 1. — С. 169—172.
45. *Fritsche C., Klein A., Wurtz D.* Hybrid GPS/GSM Localization of Mobile Terminals using the Extended Kalman Filter // IEEE. — 2009.
46. *Jagadeesh G. R., Srikanthan T., Zhang X. D.* A Map Matching Method for GPS Based Real-Time Vehicle Location // THE JOURNAL OF NAVIGATION. — 2004. — С. 429—440.
47. *Яндекс* Определение местоположения без GPS: как устроен Яндекс.Локатор. — URL: <https://habrahabr.ru/company/yandex/blog/162955/>.
48. *Lozenko D. V.* Карта Метро. — URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.blogspot.formyandroid.underground&hl=ru>.

49. *Берлин А. Н.* Сотовые системы связи: Учебное пособие. — М. : Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 360 с.
50. *Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.* Мониторинг состояния и динамики развития инфотелекоммуникационной структуры. — М., 2015.
51. *Promwad* Как определить местоположение по сетям сотовой связи (Cell ID). — 2010. — URL: <http://habrahabr.ru/company/promwad/blog/223635/>.
52. *Петряков С.* Сбор данных из внешних источников и внутренних сенсоров с помощью NextGIS Logger. — 2015. — URL: <http://gis-lab.info/qa/nextgis-logger.html>.

Приложение А

Листинги программного кода

Листинг А.1 Пример функции привязки данных на Python

```

def geo_ref(self):
    """
        Extract parsed logs from DB, iterate through them(and by device),
        split data on
    5    groups, which contains 1 user, 1 segment, and 1 movement type(
        stop, move or interchanges),
        and initialize the processing algorithm of each group. Moreover at
        the end of th function
        there is a visualizing of georeferenced result (currently only
        for cells, not for another devices
        such as accelerometr,gyroscope and etc)
        :return:
    10    """

    print 'Georeferencer starts!'
    print 30*"-"
    # use sqlalchemy sessions to faster commiting of changes
    # look at https://ru.wikibooks.org/wiki/SQLAlchemy
    15    metrocell_engine = create_engine("postgresql://" + self.server_conn
        [ 'user' ] + ':' + utilities.if_none_to_str(self.server_conn[ '
        password' ]) + '@' + self.server_conn[ 'host' ] + ':' + utilities.
        if_none_to_str(self.server_conn[ 'postgres_port' ]) + '/' + self.
        server_conn[ 'dbname' ])
    Metrocell_session = sessionmaker(bind = metrocell_engine)
    self.session = Metrocell_session()
    # iterate through devices
    20    for device in [ 'cell' ]:
        Parsed_data.__table__ = 'parsed_' + device

```

```

try:
    parsed_df = utilities.get_pd_df_from_sql(self.server_conn
        ,self.server_conn['tables']['parsed_' + device])
except:
    pass
25 parsed_zip_df = parsed_df[parsed_df['zip_id'].isin(self.
    zip_ids)]
    _parsed_zip_df = parsed_zip_df.sort_values(by = ['TimeStamp'
        ])
    _parsed_zip_df = _parsed_zip_df[_parsed_zip_df['ratio'].isnull
        ()]
    segment_slices = _parsed_zip_df.groupby(['id_from', 'id_to', '
        User', 'move_type'])
    self.proc_len = len(parsed_zip_df)
    self.step = 0
    # iterate thtough the groups
    for (id_from, id_to, User, move_type), segment_df in
        segment_slices:
            self.id_from = id_from
            self.id_to = id_to
            self.device = device
            self.key_rows = segment_df[segment_df['station_id'].
                notnull()]

            _segment_df = self.session.query(Parsed_data)\
                .filter_by(id_from = id_from, id_to=id_to, User = User,
                    move_type = move_type, ratio = None)\
                .order_by(Parsed_data.TimeStamp.asc())
            if move_type == 'inter':
                self.step+=1
                #todo: no algorithm to reference interchanges!
                continue
            45 segment_graph = str(id_from).zfill(3) + '-' + str(id_to).
                zfill(3)
            try:
                self.segment_georef(segment_graph, _segment_df, self.
                    extractor)
            except:
                self.step+=1
                50 print sys.exc_info()[0], sys.exc_info()[1]
                continue
            if move_type == 'move':
                utilities.plot_signal_power(self.server_conn, '
                    georeferencing_raw', id_from, id_to, self.city)

55 for z_id in self.zip_ids:
    utilities.update_postgre_rows(self.server_conn, self.
        server_conn['tables']['processing_status'], z_id, '
        georeferenced', True, index_col = 'zip_id')

```

Листинг А.2 Пример функции визуализации данных на R

```

eoreferencing_averaged<- function(host,port,user,password,dbname,
  plot_base,id_from,id_to,city){
  #georeferencing function
  tablename <- "averaged_cell_meta"
5  drv<- dbDriver("PostgreSQL")
  plot_folder = paste(plot_base,city,'averaged_cell',sep='/')
  con<- dbConnect(drv,dbname = dbname,host = host,port = port,user = user
    ,password = password)
  if (dbExistsTable(con,tablename)){
    seg_df <- dbGetQuery(con,paste("SELECT * FROM ",tablename," WHERE
10      city = '",city,
        "' AND segment_id='",paste(id_from,
            id_to,sep='-'),
        "' ",
        sep = ' '
    ))

    seg_df = seg_df[(seg_df$ratio>0)&(seg_df$ratio<1),]
    seg_df$laccid = paste(seg_df$LAC , seg_df$CID,sep = '_')
    GENS <- unique(seg_df$NetworkGen)
    for (GEN in GENS){
20      plot_folder_gen = paste(plot_folder,GEN,sep='/')
      if (!dir.exists(plot_folder_gen)) dir.create(plot_folder_gen)

      gen_df = seg_df[seg_df$NetworkGen == GEN,]
      MNCs = unique(gen_df$MNC)
25      for (MNC in MNCs){
        plot_folder_mnc = paste(plot_folder_gen,MNC,sep='/')
        if (!dir.exists(plot_folder_mnc)) dir.create(plot_folder_mnc)
        mnc_df = gen_df[gen_df$MNC == MNC,]
        power<-ggplot(mnc_df,aes(x=ratio,y=Power,colour = laccid))+
          ggtitle(paste("Segment ",seg_df$segment[1], sep= ': '))+theme(
            plot.title = element_text(face = 'bold'))
30      power2 = power + geom_line(size=1.5)
      plot_name = paste(id_from,'_',id_to,".png",sep = ' ')
      ggsave(filename = plot_name,plot = power2,path = plot_folder_mnc,
        width = 400,height = 400,units = 'mm')
      #saved_ref_path<-plot_folder_mnc + '/' + plot_name
      push_to_db(con,plot_name,id_from,id_to,city,MNC)
35    }
  }

  }else{
40    print("There is no such table!")
  }
}

```

Приложение Б

Картографическая визуализация состояния сотовой сети метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга в веб-гис NextGisWeb

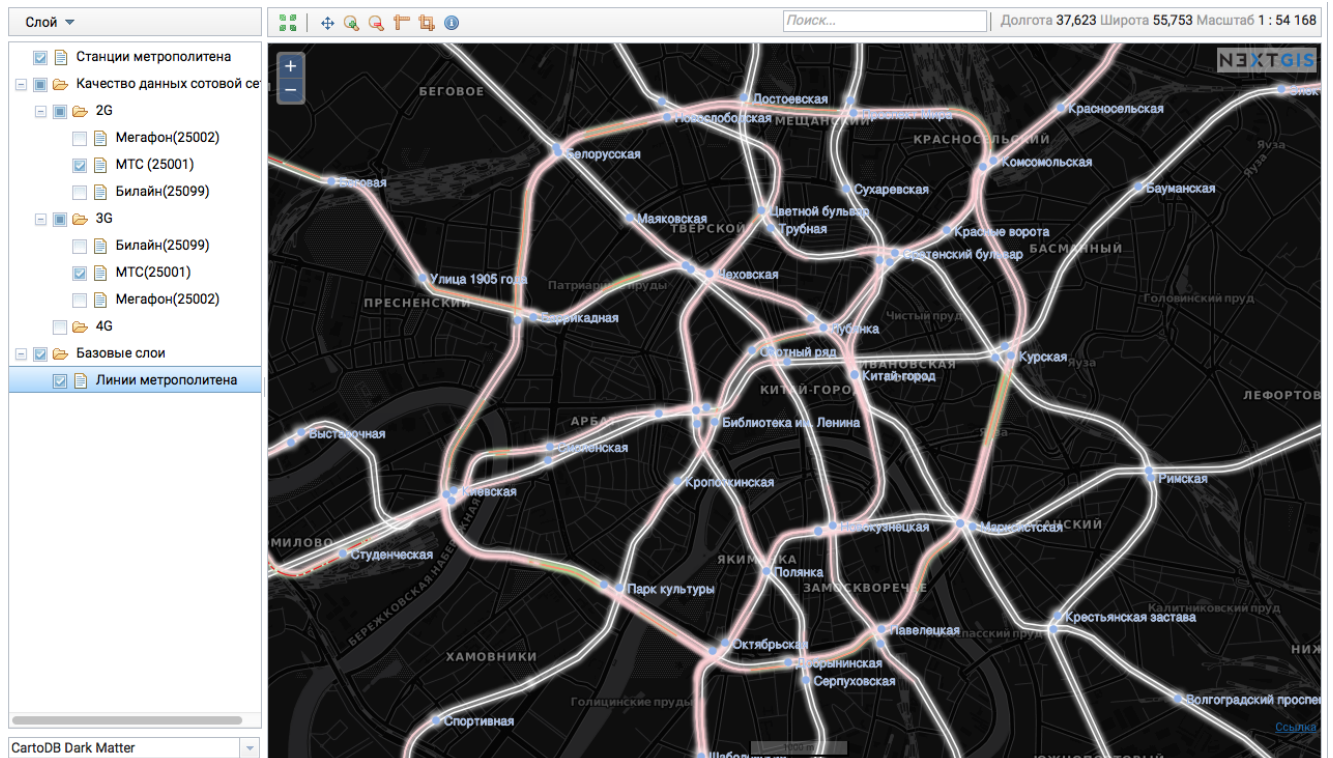


Рисунок Б.1 — Центр Москвы. MTS 2G и 3G.

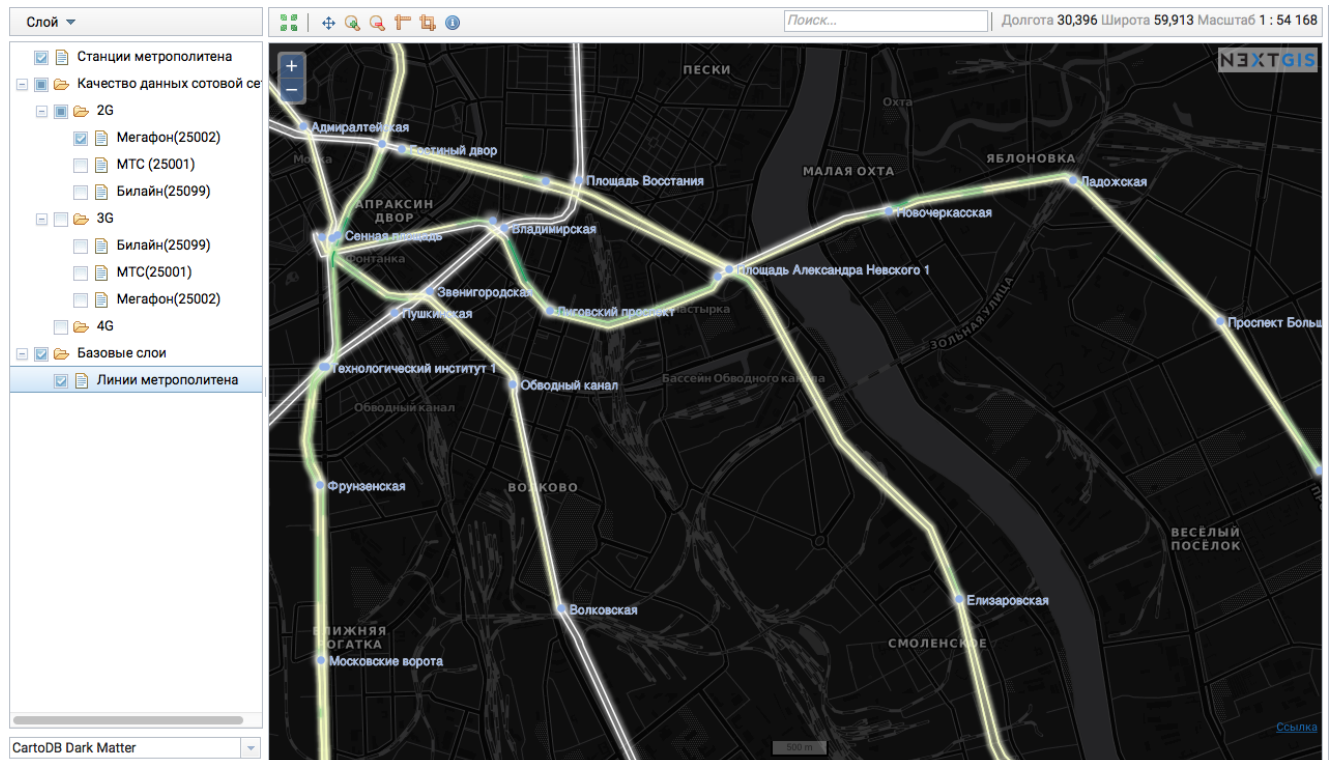


Рисунок Б.2 — Восток Санкт-Петербурга. Мегафон 2G.